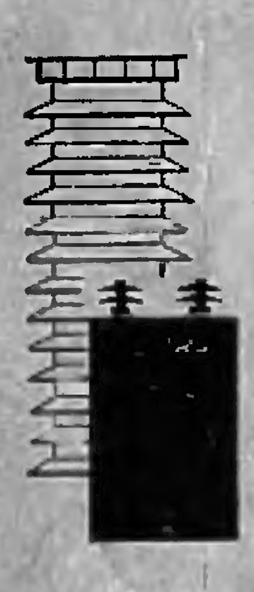
Г. С. Кучинский
Н. И. Назаров

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ



ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

Г. С. Кучинский
Н. И. Назаров

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

2-е издание, переработанное
и дополненное



МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1992

ББК 31.264.6
К 95
УДК 621.319.4

Рецензент канд. техн. наук Ю. С. Пинталь

Кучинский Г. С., Назаров Н. И.

К 95 Силовые электрические конденсаторы.— 2-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоатомиздат, 1992.— 320 с.: ил.

ISBN 5-283-00612-3

На современном уровне рассматриваются назначение и конструкция силовых конденсаторов, электрическое поле и физические процессы в диэлектрике, свойства и характеристики материалов, составляющих обкладки и диэлектрик, методы расчета электрических параметров диэлектрика, процессы возникновения и развития частичных разрядов и их характеристики. 1-е издание вышло в 1975 г., 2-е значительно переработано и дополнено с учетом новых достижений в конденсаторостроении.

Для инженерно-технических работников.

К $\frac{2202070400-038}{051(01)-92}$ 74-91 ББК 31.264.6

ISBN 5-283-00612-3

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая книга является вторым изданием и выходит спустя длительное время после выхода первого. За это время в силовом конденсаторостроении произошли значительные изменения: появились и широко применяются новые, экологически безопасные материалы, значительно повысились рабочие напряженности, внедрены диэлектрические системы на основе металлизированного диэлектрика и новая конструкция секции с загнутыми краями обкладок. Все это потребовало расширения, полного обновления содержания и изменения структуры книги. Во второе издание включен ряд новых глав, в которых подробно рассматриваются электрическое поле в секции, в том числе на краю обкладки, и влияние на него конструктивных и электрофизических параметров диэлектрика, поляризация и диэлектрические потери и их зависимость от частоты и температуры, абсорбционные явления в конденсаторном диэлектрике, некоторые вопросы технологии, применение конденсаторов. Главы, посвященные конденсаторным материалам, полностью переработаны и дополнены подробным изложением свойств полимерных пленок, экологически безопасных жидкостей и металлизированного диэлектрика, а также уточнены и дополнены методы расчета параметров диэлектрических систем на их основе. Более подробно рассмотрен расчет потерь в диэлектрике при несинусоидальном напряжении. Расширены и существенно дополнены главы, в которых рассматриваются процессы старения диэлектрика и вопросы выбора рабочей напряженности, в том числе и по результатам

ускоренных испытаний. Расширен и дополнен материал по испытаниям конденсаторов. Обновлен список литературы, в который включены работы, появившиеся в основном после выхода первого издания. Рассмотрена задача о расчете искажения поля токоотводом. Уточнены также физические процессы возникновения и развития частичных разрядов. В процессе работы над книгой ряд замечаний был высказан сотрудниками кафедры физики и технологии электроматериалов и компонентов МЭИ, за которые авторы выражают искреннюю признательность. Авторы выражают благодарность рецензенту, канд. техн. наук, доц. Ю. С. Пинталю за полезные замечания, способствовавшие улучшению книги, а также инж. Г. А. Бочарову за помощь в подборе материала по новым разработкам (§ 19.6).

Для настоящего издания Г. С. Кучинским написаны § 2.4, гл. 9, § 12.8 и гл. 15, совместно авторами — гл. 8, 10, 11, 13, 17 и 19; остальное написано Н. И. Назаровым. Авторы будут благодарны всем, кто пришлет свои отзывы и замечания по книге, которые просят направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Авторы

Глава первая
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРАХ

1.1. ОСОБЕННОСТИ И КЛАССИФИКАЦИЯ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Электрический конденсатор, широко применяемый в различных областях науки и техники, представляет собой устройство, состоящее из двух находящихся под разными потенциалами проводников (в силовых конденсаторах — обкладок), разделенных изоляционным материалом или их композицией (диэлектриком) и предназначенное для использования его электрической емкости. Этапы развития конденсаторостроения (в том числе и силового) с момента появления конденсатора (1745 г.) и до середины XX в. изложены в [1.1, 1.11], а становление и развитие силового конденсаторостроения в СССР — в [1.1]. Дальнейшее развитие и совершенствование силовых конденсаторов связано с внедрением в качестве диэлектрика синтетической полимерной пленки на основе изотактического полипропилена. Используя ее, фирма «Дженерал Электрик» с середины 60-х гг. первой начала выпуск более экономичных конденсаторов с бумажно-пленочным диэлектриком. Фирмой «Сименс» разработаны конденсаторы для повышения коэффициента мощности с однослойным пленочным диэлектриком, с обкладками в виде напыляемого на пленку слоя металлизации, обладающие свойством самовосстановления после пробоя диэлектрика. После того как были найдены способы сделать поверхность пленки шероховатой, что обеспечивает диффузию пропитывающей жидкости внутрь секции, были разработаны и начался промышленный выпуск еще более экономичных конденсаторов с многослойным пленочным диэлектриком и обкладками из алюминиевой фольги.

Силовые конденсаторы применяются непосредственно в силовых сетях высокого и низкого напряжений или в силовых устройствах повышенных (до 10 кГц) частот. Они применяются как отдельными единицами, так и в виде комплектных конденсаторных установок или мощных батарей с параллельно-последовательным соединением отдельных единиц. Как правило, конденсаторы эксплуатируются в длительном режиме, под воздействием (в зависимости от назначения) разнообразных форм напряжения: синусоидального промышленной или повышенных частот; несинусоидального с постоянной составляющей или без нее; постоянного, а также импульсного с различной формой и частотой повторения импульсов. Изоляция конденсатора работает при высоких напряженностях электрического поля, значительно превосходящих рабочие напряженности в любой другой электротехнической конструкции и сравнительно высокой температуре, обусловленной внутренним тепловыделением. Кроме того, она подвергается воздействию значительных кратковременных перенапряжений. В отличие от конденсаторов, применяемых в радиоэлектронике, связи и т. п., силовые конденсаторы (за исключением нескольких типов) имеют значительные объем и массу, а также большую емкость, реактивную мощность и запасаемую энергию в конденсаторной единице.

Выделение силовых конденсаторов в особую группу в известной мере условно, поскольку нельзя указать точного признака разделения, однако их специфичность подчеркивается определяющим словом *силовой* в названии. Наличие общих компонентов в изоляции, а также общая конструкция секции и пакета делают создание классификационной системы силовых конденсаторов сложной задачей. Силовые конденсаторы обычно классифицируются в соответствии с областями их применения, режимами работы и конструктивными особенностями. По этим признакам различают конденсаторы для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной и повышенных (электротермические) частот, связи, отбора мощности, делителей напряжения, продольной компенсации линий электропередачи, для работы в линиях электропередачи постоянного тока, импульсные и др.

1.2. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Силовой конденсатор состоит из двух проводящих лент (обкладки), разделенных изоляционным материалом или их композицией (диэлектрик). Такая диэлектрическая система обладает электрической емкостью, представляющей собой по

ГОСТ 19880-74 скалярную величину, численно равную абсолютному значению отношения электрического заряда одного проводника к разности потенциалов проводников при условии, что проводники имеют одинаковые, но противоположные по знаку заряды и что все другие проводники бесконечно удалены. Физически емкость характеризует способность системы накапливать электрический заряд, который равен произведению емкости на разность потенциалов, и оба эти параметра определяются свойствами и качеством диэлектрика и конструкцией системы.

В силовых конденсаторах в отличие от конденсаторов для радиоэлектроники, связи и т. д. используется ограниченный ассортимент изоляционных материалов, разделяющих обкладки. Ими являются специальная конденсаторная бумага и синтетические полимерные пленки в форме лент, наматываемых в рулоны, что позволяет производить машинную намотку секций. Такой слоистый диэлектрик может состоять только из бумаги — бумажный диэлектрик, чередующихся слоев бумаги и пленки — комбинированный бумажно-пленочный диэлектрик или только из пленки — чисто пленочный диэлектрик. Для устранения воздуха, находящегося между слоями твердых материалов и в порах бумаги, он пропитывается более электрически прочным и имеющим большую диэлектрическую проницаемость изоляционным материалом. Как правило, таким пропитывающим материалом являются электроизоляционные жидкости, имеющие ряд преимуществ — хорошее заполнение, отсутствие усадки и др.— перед пропиткой твердеющими (воски и др.) материалами. В отличие от всегда многослойных (содержащих более одного слоя твердого материала) бумажного или бумажно-пленочного диэлектриков чисто пленочный диэлектрик может быть однослойным.

В качестве обкладок используются алюминиевая фольга (конструкция с фольгой), слой цинка или алюминия, нанесенный на одну сторону бумаги или пленки, образующих диэлектрик (конструкция с металлизированным диэлектриком), двусторонне-металлизированная лента бумаги, у которой обе металлизированные поверхности электрически соединены и электрическое поле в бумаге отсутствует — так называемая мягкая обкладка. Последняя может иметь различные разновидности в исполнении. При прочих равных условиях система с фольгой имеет лучшие тепловые характеристики по сравнению с двумя другими, но последние обладают свойством самовосстановления емкости после пробоя. Это происходит за счет выжигания дугой при пробое небольшого участка металлизации, окружающего место пробоя, практически без перерыва в работе конденсатора. Возможно использование комбинированных обкладок, из которых одна является фольговой,

другая — металлизированной [1.12]. Такая система, сохраняя свойства самовосстановления, позволяет улучшить тепловые характеристики.

Основными и наиболее распространенными в высоковольтных силовых конденсаторах являются системы с бумажно-пленочным и пленочным диэлектриками и фольговыми обкладками (рис. 1.1, *а*, листы бумаги заменены пленкой), имеющие малые потери и позволяющие создавать конденсаторы с высокими удельными характеристиками в широком диапазоне напряжений и частот. Разделение слоев пленки слоями бумаги, являющейся пористой системой и играющей роль фитиля, обеспечивает хорошую пропитку бумажно-пленочного диэлектрика. Применение пленочного диэлектрика стало возможным только после разработки способа обработки поверхности пленки, создающего на ней микрокапиллярную систему, которая обеспечивает пропитку диэлектрика. Необработанные поверхности, слипаясь, не пропускают пропитывающую жидкость. Рабочие напряженности в бумажном диэлектрике достигают 22 МВ/м, в бумажно-пленочном — 40 МВ/м и в пленочном — более 50 МВ/м (при 50 Гц). Последний позволяет получать удельную характеристику более 6,5 квар/дм^3. Диэлектрическая система с мягкими обкладками и полипропиленовой пленкой в один слой в качестве диэлектрика с пропиткой нефтяным маслом (пористая обкладка является фитилем) и металлопленочная (двусторонне-металлизированная полипропиленовая пленка) без пропитки или с частичной пропиткой (только торцов секции) позволяют создать новый тип силового конденсатора — самовосстанавливающийся — с рабочей напряженностью до 70 МВ/м и удельной объемной характеристикой до 9,4 квар/дм^3 (для повышения коэффициента мощности и других применений). Мощность потерь в такой системе вдвое ниже потерь в бумажно-пленочном диэлектрике и составляет около 0,05 Вт/квар, вследствие чего их собственный

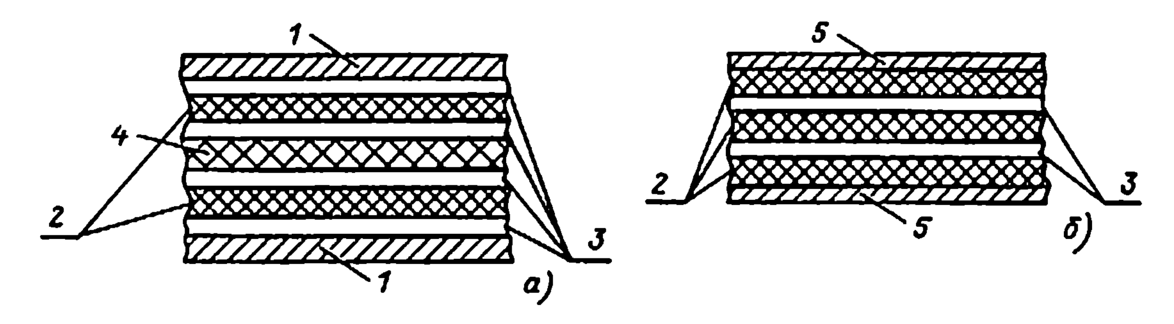


Рис. 1.1. Диэлектрические системы с обкладками из фольги (*а*) и слоем металлизации (*б*):

1 — алюминиевая фольга; *2* — бумага; *3* — пропитывающая жидкость; *4* — пленка; *5* — слой металлизации

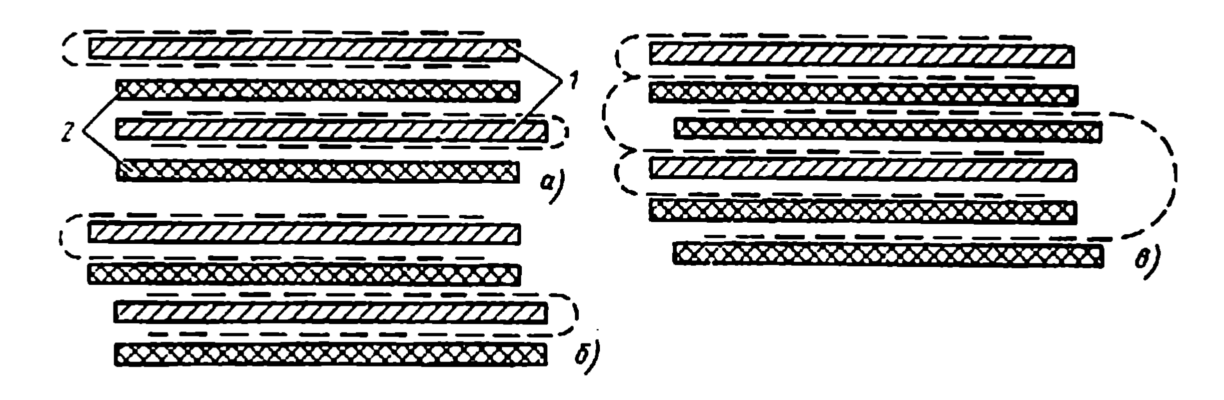


Рис. 1.2. Диэлектрические системы с мягкими обкладками:
1 — обкладка; 2 — диэлектрик; пунктир — металлизация (рис. б и в — односторонняя металлизация)

нагрев невелик и они могут быть использованы при более высоких температурах окружающей среды. Исполнения системы с мягкими обкладками могут быть различными. Исполнение, показанное на рис. 1.2, *а*, является простейшим. В исполнении на рис. 1.2, *б* бумажная лента металлизируется только с одной стороны; этой стороной она прилегает к металлизированной стороне односторонне-металлизированной пленки активного диэлектрика. На рис. 1.2, *в* мягкие обкладки и пленки имеют одностороннюю металлизацию, но располагаются так, что между двумя мягкими обкладками находятся две параллельно работающие пленки. Как видно из рис. 1.2, *в*, ленты металлизируются так, чтобы обкладки одного полюса были у одного края, другого — у другого края ленты.

1.3. СЕКЦИЯ И ПАКЕТ

Конструктивную основу силового конденсатора составляет секция, являющаяся элементарным конденсатором. Секции для диэлектрических систем с мягкими обкладками и металлизированной пленкой являются спирально намотанными цилиндрическими, для остальных — спирально намотанными плоскопрессованными. Секции первого типа наматываются на жесткий цилиндр из изоляционного материала, остающийся в ней и после намотки, благодаря чему она сохраняет цилиндрическую форму. Секции второго типа наматываются на цилиндрическую или плоскую оправку, по окончании намотки снимаются с нее, складываются по диаметру и превращаются в плоскопрессованные. Хотя секция является спирально намотанной, ее диэлектрическая система образует плоский конденсатор, слои диэлектрика которого расположены параллельно обкладкам и образуют последовательную схему соединения при переходе с одной обкладки на другую (рис. 1.3).

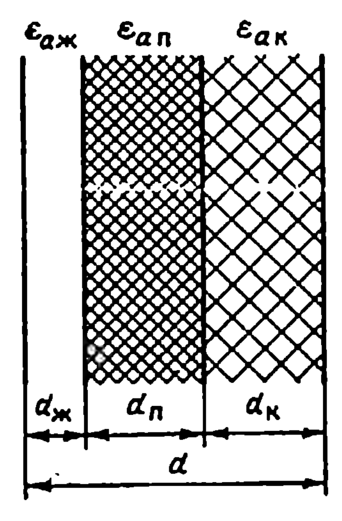


Рис. 1.3. Схема замещения трехкомпонентного диэлектрика:

$d_к$, $d_п$, $d_ж$ — толщины соответственно клетчатки, пленки и пропитывающей жидкости; $\varepsilon_{aк}$, $\varepsilon_{aп}$, $\varepsilon_{aж}$ — их абсолютные диэлектрические проницаемости

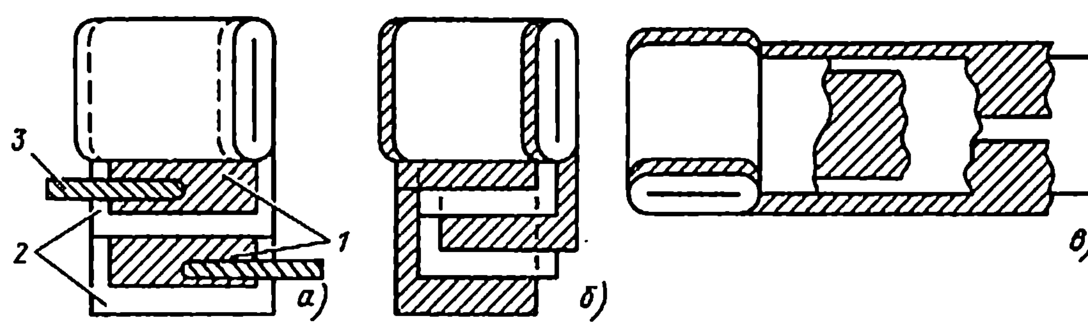


Рис. 1.4. Конструкции секций:

а — со скрытыми обкладками; *б* — с выступающими обкладками; *в* — на двойное напряжение; *1* — обкладка; *2* — диэлектрик; *3* — токоотвод

В плоскопрессованной секции листы диэлектрика и фольги вследствие их упругости неплотно прилегают друг к другу, и между ними остается некоторое пространство, которое можно варьировать, изменяя давление на плоские стороны секции или, как принято называть, изменяя ее степень сжатия или запрессовки. При этом изменяются толщина секции, диэлектрическая проницаемость ε_a, тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика и другие характеристики. Степень сжатия оценивается коэффициентом запрессовки (термин введен С. К. Медведевым) k, связанным с параметрами диэлектрика [8.1]:

$$k=\left[d_т/\left(d_т+d_ж\right)\right]=\left(nd_1+n'd'_1\right)/d, \qquad (1.1)$$

где $d_т=nd_1+n'd'_1$ — толщина твердых материалов диэлектрика; d_1 и n — соответственно толщина листа и число листов бумаги; d'_1 и n' — то же пленки; $d_ж$ — суммарная толщина находящейся между слоями пропитывающей жидкости; $d=d_т+d_ж$ — фактическая толщина диэлектрика между обкладками.

При отсутствии какого-либо компонента соответствующий член в (1.1) выпадает. При пользовании этой формулой предполагается, что листы твердого диэлектрика имеют равномерную толщину и удалены друг от друга на одинаковое расстояние, что не всегда имеет место в реальном диэлектрике,

но такая схема дает хорошее совпадение с опытом. Из (1.1) следует

$$d=(nd_1+n'd'_1)/k. \qquad (1.2)$$

Зная nd_1 и $n'd'_1$ и задаваясь значением k, из (1.2) можно найти d. Для бумажного и бумажно-пленочного диэлектриков обычно $0{,}9 \leqslant k \leqslant 0{,}95$, что соответствует давлению на плоские стороны секции около 0,5 МПа. При $k>0{,}95$ в секции вследствие пережатия могут возникнуть повреждения, снижающие электрическую прочность диэлектрика. Для пленочного диэлектрика с учетом его набухания $0{,}75 \leqslant k \leqslant 0{,}9$. Для количественных расчетов электрофизических параметров обоих типов секций используется одна общая эквивалентная схема, показанная на рис. 1.3. Методы определения ее параметров изложены в гл. 8. Этими же индексами обозначаются далее все величины, относящиеся к данному компоненту.

Конструктивно секция может быть выполнена со скрытыми (рис. 1.4, *а*) или выступающими (рис. 1.4, *б*) обкладками или может состоять из нескольких подсекций, как на рис. 1.4, *в*, где приведена секция на двойное напряжение. Одна обкладка в ней, являющаяся общей, наматывается скрыто. Две другие обкладки, гальванически не связанные между собой, могут наматываться скрыто или с выступающими краями. Здесь в одной секции через общую обкладку последовательно соединяются две подсекции. Конструктивной разновидностью секции со скрытыми обкладками является секция, в которой края одной из обкладок загибаются, при этом они не только скругляются, но могут сдвигаться относительно краев другой, незагнутой, обкладки (см. рис. 12.5), в результате чего снижаются искажения поля в этой зоне и повышается напряжение возникновения ЧР, что позволяет выбирать более высокие напряженности по сравнению с секцией с незагнутыми краями обкладки. Отвод тока от секции со скрытыми обкладками осуществляется специальными токоотводами, вкладываемыми в нее при намотке.

В подавляющем большинстве конденсаторов применяются плоскопрессованные секции, из которых набирается пакет, имеющий форму прямоугольного параллелепипеда. Эта форма позволяет создать наиболее экономичный конденсатор. Секции в пакете соединяются параллельно, последовательно или смешанно. В большинстве случаев пакет является самостоятельной конструктивной единицей. Иногда в одном конденсаторе используются несколько пакетов, образующих единое конструктивное целое, называемое выемной частью. Пакет или выемная часть помещаются в прямоугольный или цилин-

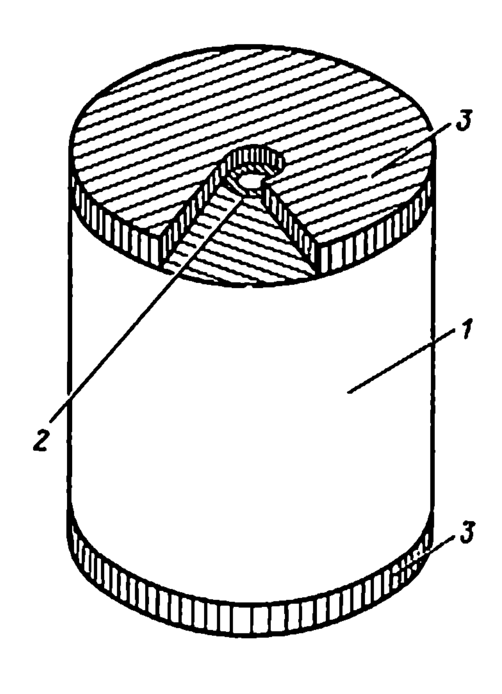


Рис. 1.5. Цилиндрическая секция (диэлектрическая система с мягкими обкладками и металлопленочная);
1 — секция; *2* — изоляционный цилиндр; *3* — шоопировка

дрический корпус из металла или изоляционного материала, который после прохождения цикла технологической обработки герметизируется, с тем чтобы исключить попадание влаги и воздуха из окружающей среды внутрь конденсатора. Набор образующих пакет секций может быть впрессован непосредственно в корпус, которым он и удерживается в спрессованном состоянии. Напряжение подается к схеме через проходные изоляторы (выводы). Конструкция цилиндрической секции с мягкими обкладками показана на рис. 1.5.

1.4. КОНСТРУКЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ

Большинство конденсаторов имеет конструкцию корпуса в виде прямоугольного параллелепипеда. Там, где по условиям эксплуатации требуется значительная длина путей утечки внешней изоляции (конденсаторы связи, отбора мощности, для делителей напряжения и т. п.), применяются ребристые корпуса цилиндрической формы из фарфора. Как правило, конденсаторы в таких корпусах изготавливаются на напряжения от 35 кВ и выше.

Для изготовления прямоугольных корпусов используются как металлы (сталь, латунь, алюминий), так и различные изоляционные материалы (полипропилен, полиамид и др.). Металлические корпуса применяются для конденсаторов со значительным тепловыделением, изоляционные — для конденсаторов на высокие напряжения, тепловыделение в которых невелико. Герметизация металлических и прямоугольных корпусов из изоляционного материала достигается сваркой и пайкой, фарфоровых цилиндрических — с помощью резиновых уплотнений.

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока промышленной частоты выпускаются по ГОСТ 1282-88 и ГОСТ 27390-87. По объему производства (до 70%) они занимают первое место в общем выпуске силовых конденсаторов и относятся к энергосберегающему оборудованию. Условия массового производства требуют максимального сокращения и унификации их типоразмеров. Отраслевыми техническими условиями устанавливаются три

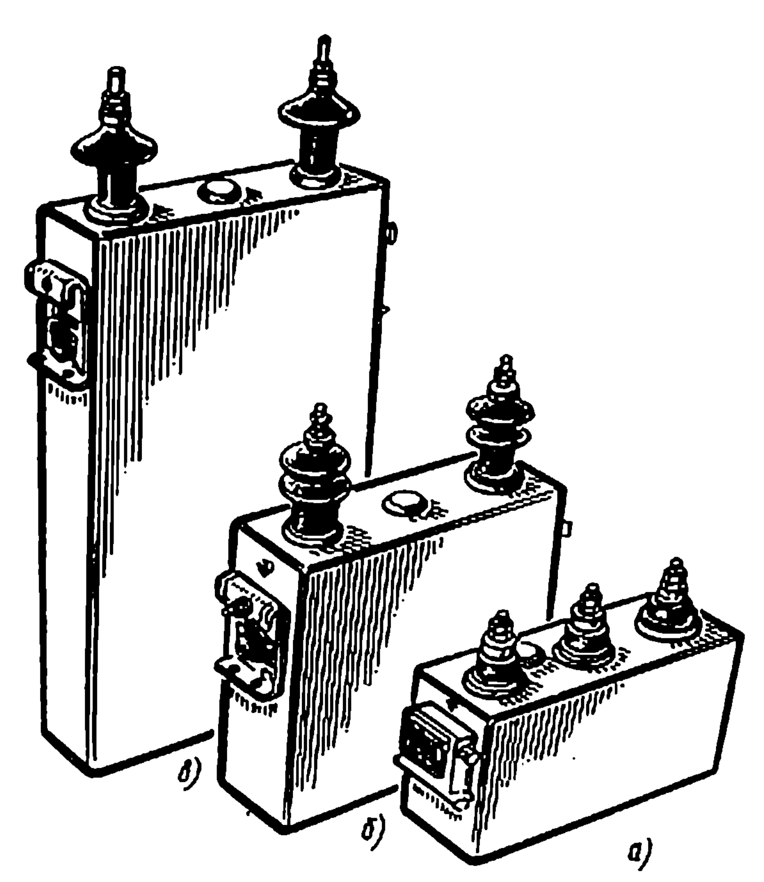


Рис. 1.6. Конденсаторы типов КЭ и КЭК (К — косинусный, Э — экологически безопасная пропитка, К — комбинированный диэлектрик) для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты:
а — нулевой (0) габарит; *б* — первый (1) и *в* — второй (2) габариты

основных габарита их корпусов: второй (рис. 1.6, *в*) с высотой 640 мм, первый (рис. 1.6, *б*) — 325 мм и нулевой (рис. 1.6, *а*) — 180 мм; площади оснований у всех габаритов составляют 380×120 мм^2 (этот размер сохраняется и для металлических корпусов унифицированных серий других типов конденсаторов). Этими габаритами обеспечивается широкий (от 4 до 250 квар) диапазон мощностей в конденсаторной единице. Напряженности поля в бумажном диэлектрике этих конденсаторов составляют для бумаг среднего качества 15—17 МВ/м в низковольтных ($U_{ном} \leqslant 1000$ В) и 17—18 МВ/м в высоковольтных ($U_{ном} > 1000$ В) конденсаторах, а для бумаг повышенного качества соответственно 15—17 и 20—21 МВ/м, что не позволяет получить высокие удельные характеристики. В конденсаторах с бумажно-пленочным и пленочным диэлектриками напряженности поля значительно выше (соответственно порядка 40 и 50 МВ/м), и поэтому более чем в 2 раза выше их технико-экономические показатели.

Конденсаторы предназначены для работы при естественном охлаждении и изготавливаются для установки на открытом воздухе (наружного исполнения) и внутри помещений

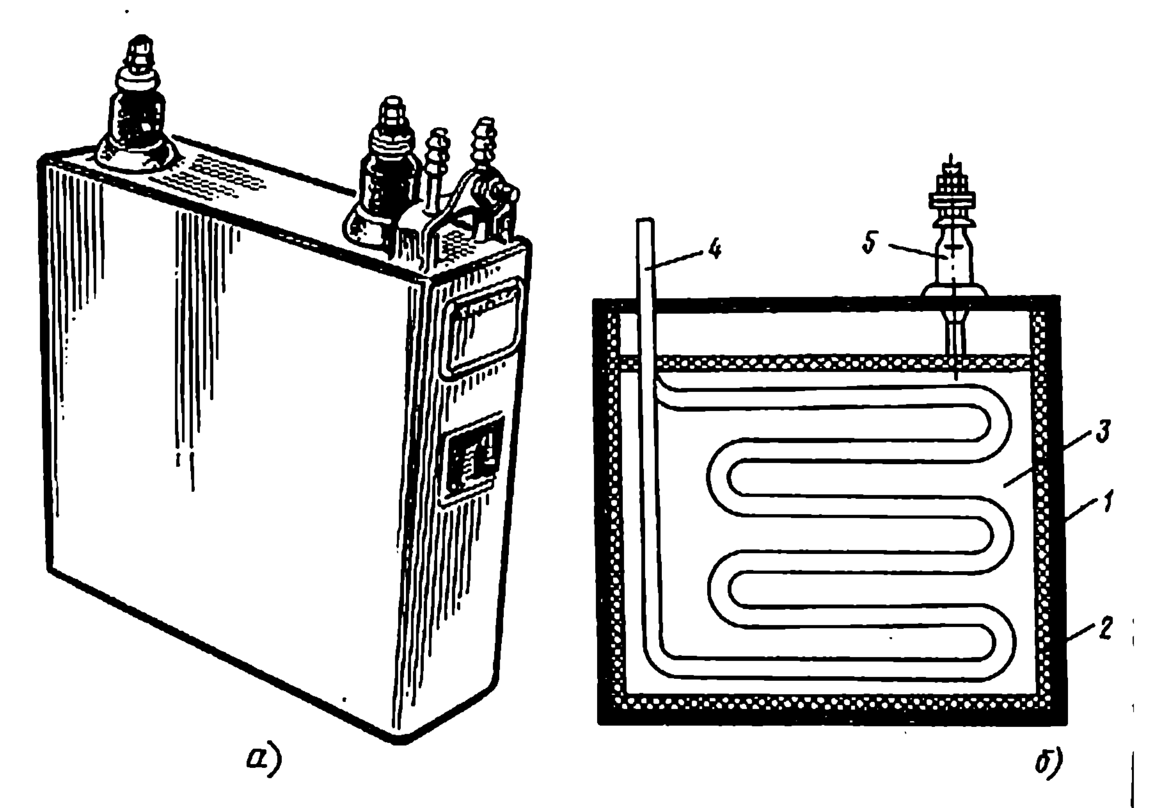


Рис. 1.7. Конструкция конденсатора ЭЭВК (Э — электротермический; Э — экологически безопасная пропитка, В — водяное охлаждение, К — комбинированный диэлектрик):

а — внешний вид конденсатора с изолированными от корпуса секциями; *б* — элементы конструкции конденсатора с корпусом и охлаждающей системой, находящимися под напряжением: *1* — корпус; *2* — изоляция пакета от корпуса; *3* — пакет; *4* — охлаждающие трубки; *5* — проходной изолятор

(внутреннего исполнения). Конденсаторы наружного исполнения выпускаются для работы в умеренном климате и тропического исполнения, а также для районов с холодным климатом (исполнение ХЛ). Конструктивно конденсаторы исполнения ХЛ не отличаются от конденсаторов других исполнений, но применяемые в них материалы должны обеспечивать нормальную работу при температурах до $-60 \div -65°$ С. В первую очередь это относится к пропитывающим жидкостям, которые должны иметь соответствующую температуру застывания, но также и к характеристикам других материалов, например уплотняющим резинам для конденсаторов в фарфоровых корпусах.

Конденсаторы для электротермических установок на частоты от 0,5 до 10 кГц типа ЭЭВК (рис. 1.7, *а*) предназначены для повышения коэффициента мощности этих установок и занимают второе место в общем выпуске. Они выпускаются по ГОСТ 18689-81 в стальных или латунных корпусах унифицированной серии с высотой корпуса 350 мм. Ввиду значительных тепловых потерь, которые не могут быть отведены естественным охлаждением, в электротермических конденсаторах с бу

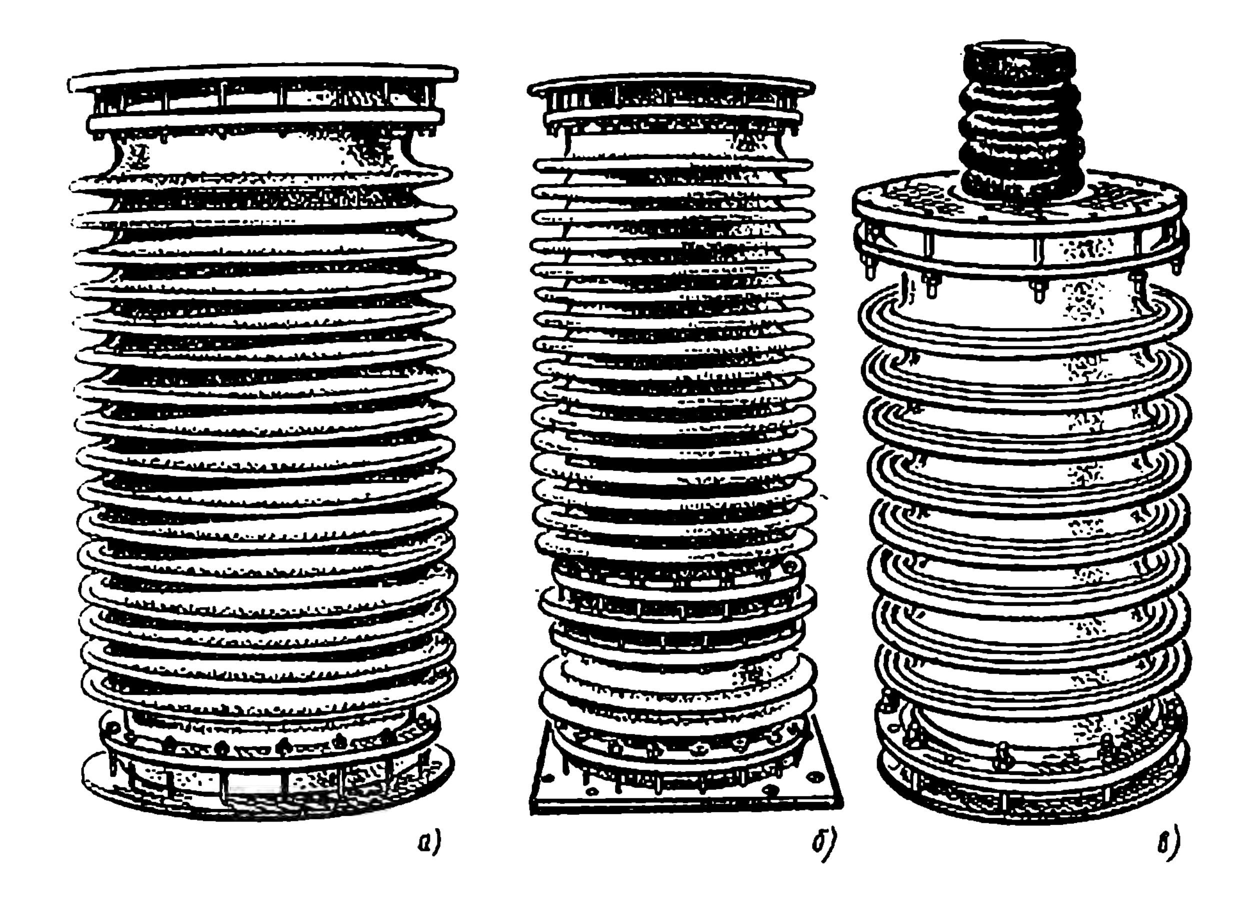


Рис. 1.8. Конденсаторы связи и деления напряжения серий СМ, ДМ, СМП (С — связи, Д для делителей напряжения, М пропитка нефтяным маслом, П — совмещенный с подставкой):

а — конденсатор типа СМ 166/$\sqrt{3}$-14 (наружный диаметр 700 мм, высота 1320 мм); *б* — конденсатор типа СМП 166/$\sqrt{3}$-14; *в* — конденсатор типа ДМ 80-2,1-1У1 (наружный диаметр 350 мм, высота 1380 мм); *г* — колонна конденсаторов (см. с. 16)

мажным диэлектриком применяется принудительное водяное охлаждение, осуществляемое с помощью змеевика из медной трубки, по которому протекает охлаждающая вода. В наиболее распространенной конструкции змеевик напаивается непосредственно на выступающую фольгу одного полюса всех секций, как это показано на рис. 1.7, *б*. Здесь охлаждающая система и связанный с ней корпус конденсатора находятся под напряжением. В другой конструкции каждая секция изолируется на полное испытательное напряжение и в пакете между ними прокладывается медная фольга, на которую напаивается охлаждающая система. В этом случае ни охлаждающая система, ни корпус не находятся под напряжением. Однако в такой конструкции должны применяться диэлектрические материалы с меньшим, чем в первом случае, значением tg δ вследствие худшего отвода тепла. Рабочие напряженности поля в бумажном диэлектрике таких конденсаторов составляют при номи-

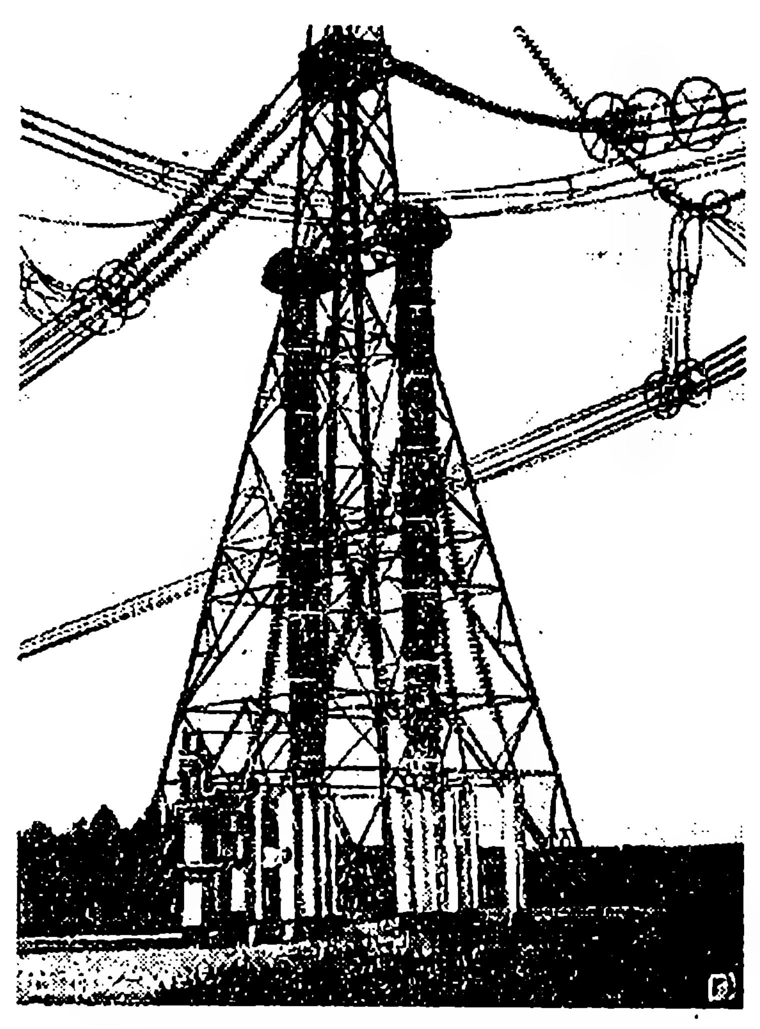


Рис. 1.8

нальной частоте 0,5 кГц от 15,5 до 16 МВ/м, при 1 кГц около 12,5 МВ/м, при 2,4 кГц от 8 до 9 МВ/м, при 4 кГц от 7 до 7,5 МВ/м, при 10 кГц от 4,5 до 5 МВ/м. Применение бумажно-пленочного и пленочного диэлектриков в этих конденсаторах позволяет повысить мощность в единице при сохранении водяного охлаждения.

Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности, делителей напряжения и измерения напряжения в фарфоровых корпусах типов СМ, ОМ, ДМ, НДЕ (рис. 1.8, *а—в*) выпускаются по ГОСТ 15581-80 в виде отдельных элементов, из которых собираются колонны на соответствующее напряжение фазы линии электропередачи (рис. 1.8, *г*). Рабочие напряженности поля в них составляют от 12 до 25 МВ/м.

Импульсные конденсаторы предназначаются для различных применений в режиме «зарядка — разряд». Они выпускаются в металлических корпусах как унифицированного, так и других размеров, а также в изоляционных корпусах (рис. 1.9, *а—г*).

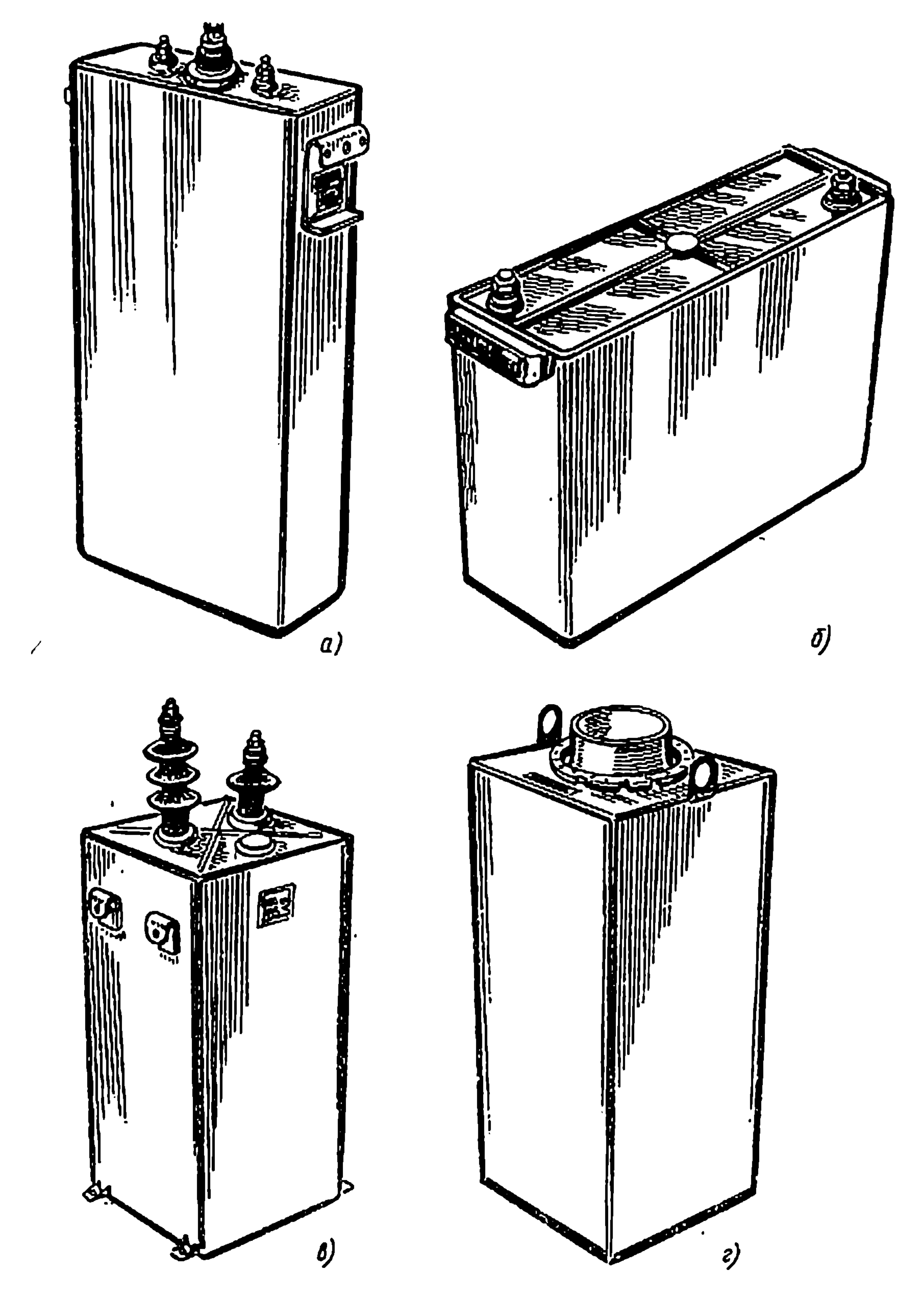


Рис. 1.9. Импульсные конденсаторы серии ИК (И — импульсный, К — пропитка касторовым маслом):
а — ИК-6-150-ТС4; *б* — ИК-100-0,4-4ХЛ4; *в* — ИКГ-50-1-УХЛ4 (Г — для электрогидравлического эффекта); *г* — ИКМ-50-3-УХЛ4 (М-малоиндуктивный)

Многообразие конструктивных исполнений импульсных конденсаторов обусловлено особенностями тех установок, в которых они работают. Рабочие напряженности равны 50—150 МВ/м и более.

1.5. КОНСТРУКЦИИ ВЫВОДОВ

Напряжение к пакету, находящемуся в герметично закрытом корпусе, подается с помощью специальных проходных фарфоровых изоляторов (рис. 1.10). В зависимости от конструкции выводов, которые могут быть в виде цилиндрических стержней, плоских шин, коаксиальных цилиндров и др., они могут иметь различные исполнения. Изоляторы герметично соединяются с корпусом конденсатора (рис. 1.11). Герметичность соединения достигается металлизацией узких участков фарфора, к которым припаивается металлическая арматура. Затем она герметично припаивается к корпусу. Сверху к изолятору припаивается металлический колпачок, служащий для присоединения конденсатора к внешней сети. Герметизация переходного соединения металл—фарфор возможна также с помощью резины.

Недостатком обычно применяемых выводов является их значительная индуктивность. Для ее снижения в импульсных конденсаторах применяются специальные конструкции выводов. В конструкции на рис. 1.12, *а* собственно выводы *1* представляют собой медные листы, изогнутые под углом 90°. Они герметично проходят через изоляционную часть *4* крышки и разделяются изоляционной прокладкой *6* снаружи и бумажно-пропитанной изоляцией *7* внутри конденсатора. Металлическая арматура *5* крышки служит для приварки крышки к стенкам корпуса *8*. Шины *3* от секций подводятся к сборным шинам *2*, соединенным с выводом *1*. Более сложную конструкцию имеет вывод, изображенный на рис. 1.12, *б*. Он состоит из цилиндра сложного профиля *3*, изготовляемого обычно из эпоксидной смолы, и вывода *1*. С помощью металлического диска *4* цилиндр *3* герметично сваривается с прямоугольной частью крышки корпуса. На диске *4* имеется специальный выступ *5*, к которому приваривается контактное кольцо *2*, являющееся вторым полюсом вывода.

1.6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРОВ

Показателями технического уровня и экономичности конденсаторов являются удельные характеристики, представляющие отношение одного из его выходных параметров — емкости $C_к$, реактивной мощности Q или запасаемой энергии W — к его полному объему V или массе G. Первая характеристика называется удельной по объему, вторая — удельной по массе.

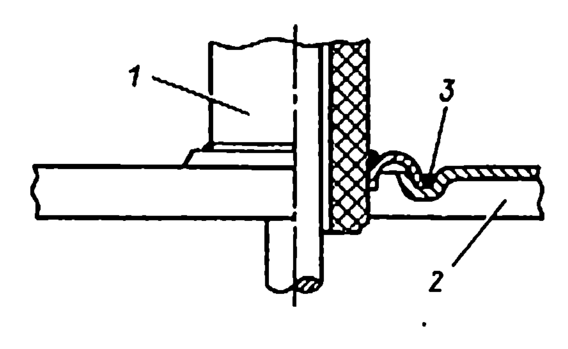


Рис. 1.10. Конструкция проходного фарфорового изолятора (армированного):

1 — изолятор; *2* — колпачок с контактным стержнем; *3* — переходное кольцо; *4* — припой



→

Рис. 1.11. Соединение изолятора с корпусом:

1 — изолятор армированный; *2* — корпус; *3* — припой

а)

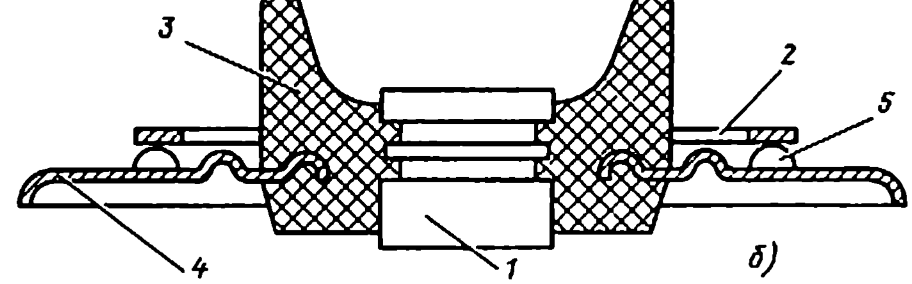


Рис. 1.12. Конструкции малоиндуктивных выводов

Общей для всех типов конденсаторов является удельная емкость:

$$C'_{уд}=C_к/V; \qquad (1.3а)$$

$$C''_{уд}=C_к/G. \qquad (1.3б)$$

Если учитывать только активный объем конденсатора, т. е. объем диэлектрика, в котором запасается электрическая энергия и который равен $V_а=Sd$, где S — площадь обкладок и d — толщина диэлектрика, то удельную емкость по активному объему $C'_{уд.а}$ можно выразить через параметры диэлектрика (для плоского конденсатора $C_к=\varepsilon_а S/d$, где $\varepsilon_а$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость):

$$C'_{уд.а}=C_к/V_а=\varepsilon_a/d^2 \qquad (1.3в)$$

Через удельную емкость могут быть выражены другие удельные характеристики конденсатора. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности, являющиеся генераторами реактивной мощности Q, характеризуются удельной реактивной мощностью $Q'_{уд}=Q/V$ и $Q''_{уд}=Q/G$. После подстановок в эти формулы $Q=2\pi f C_к U^2_{ном}$ получим

$$Q'_{уд}=2\pi f C'_{уд} U^2_{ном}; \qquad (1.3г)$$

$$Q''_{уд}=2\pi f C''_{уд} U^2_{ном}. \qquad (1.3д)$$

Удельная реактивная мощность по активному объему с использованием (1.3в)

$$Q'_{уд.а}=2\pi f \varepsilon_а E^2_р, \qquad (1.3е)$$

где $E_р=U_{ном}/d$ — действующее значение рабочей напряженности.

Для конденсаторов, используемых в качестве накопителей энергии, $W=C_к U^2_{ном}/2$ и удельные энергии

$$W'_{уд}=C'_{уд} U^2_{ном}/2; \qquad (1.3ж)$$

$$W''_{уд}=C''_{уд} U^2_{ном}/2. \qquad (1.3з)$$

Удельная энергия по активному объему с использованием (1.3в)

$$W'_{уд.а}=\varepsilon_а E^2_{рm}/2, \qquad (1.3и)$$

где $E_{рm}$ — амплитуда рабочей напряженности.

Конденсаторы связи, отбора мощности, для делителей напряжения и другие в фарфоровых корпусах характеризуются удельной реактивной мощностью, хотя удельные характеристики для них не являются показательными, поскольку габариты их определяются длиной пути утечки внешней изоляции.

Обозначим обобщенную удельную характеристику $H'_{уд.а}$. Тогда выходной параметр H в общем случае можно представить в виде $H=H'_{уд.а}V_а$. При $V_а=\text{const}$ увеличение H возможно только за счет увеличения $H'_{уд.а}$, что, в свою очередь, может быть достигнуто либо за счет увеличения ε_a диэлектрика

конденсатора, либо за счет повышения $E_р$. Значение ε_a определяется электрофизическими свойствами диэлектрика. Значение $E_р$ зависит как от характеристик диэлектрика, так и от назначения, условий и режима работы и требуемого ресурса конденсатора. Влияние электрофизических и конструктивных параметров на удельные характеристики подробно рассматривается в гл. 12. Увеличение объема $V_а$, как это показано в [12.1], не позволяет увеличить $H'_{уд.а}$ за счет улучшения использования материалов. Достигнутая в массовом производстве удельная объемная характеристика у конденсаторов для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты с диэлектриком из пропитанной полипропиленовой пленки составляет 6,5—6,7 квар/дм^3. В отдельных конструкциях она достигает 7,5—9,5 квар/дм^3. Приведенные значения соответствуют ресурсу в 20 лет. У импульсных конденсаторов при ресурсе порядка $5 \cdot 10^4$ импульсов удельная объемная характеристика (удельная энергия) составляет 100—300 Дж/дм^3, или 0,05—0,2 Дж/г. При ресурсе порядка 10^3 импульсов при апериодическом разряде удельная энергия может достигать 1 кДж/дм^3, или 0,5 Дж/г. Разработаны опытные образцы с удельной энергией до 3—5 Дж/г. Для работы в космических условиях разработан конденсатор на частоту 40 кГц с диэлектриком из пропитанной полипропиленовой пленки с удельной характеристикой по массе 24 квар/кг [19.8].

1.7. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ

Внешние факторы в месте эксплуатации конденсатора — климатические (температура, влажность и давление окружающего воздуха, осадки, ветер, солнечная радиация), загрязнения (пыль, соляной туман, коррозионно-активные вещества), механические воздействия (удары, тряска, вибрация), наличие радиации — оказывают значительное влияние на его работоспособность. Они влияют как на режим работы внутренней изоляции — диэлектрика (окружающая температура, солнечная и радиоактивная радиация, механические воздействия), так и на характеристики внешней изоляции и состояние конденсатора (вся совокупность климатических факторов, загрязнения), вызывая изменение электрической прочности внешней изоляции и разрушение защитных покрытий и коррозию металлических корпусов.

Климатические исполнения и категории размещения технических изделий регламентируются ГОСТ 15150-69, в соответствии с которым предусмотрены следующие климатические исполнения (в скобках указаны латинские обозначения, принятые в некоторых странах):

а) для эксплуатации в макроскопических районах суши, реках и озерах с климатом У (N) — умеренным, ХЛ (F) — холодным, ТВ (TH) — влажным тропическим, ТС (TA) — сухим

тропическим, Т (Т) — как сухим, так и влажным тропическим, О (U) — общеклиматического исполнения (для всех районов на суше);

б) для эксплуатации на морских судах в макроскопических районах с климатом М (М) — умеренно холодным морским, ТМ (МТ) — тропическим морским и для судов каботажного плавания или иных судов для плавания только в тропической зоне, ОМ (MU) — для неограниченного района плавания, В (W) — для всех районов на суше и на море.

Для указанных климатических исполнений предусматриваются следующие категории размещения (цифра указывает категорию):

а) для работы на открытом воздухе — 1;

б) для работы в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний их на открытом воздухе и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, например под навесом или в кожухе комплексного устройства категории 1 (отсутствие прямого воздействия солнечной радиации и атмосферных осадков) — 2;

в) для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственного регулирования климатических условий, где колебания температуры и влажности, а также наличие песка и пыли значительно меньше, чем на открытом воздухе,— 3;

г) для работы в помещениях с искусственно регулируемым климатом, например в закрытых отапливаемых, охлаждаемых или вентилируемых помещениях,— 4;

д) для работы в помещениях с повышенной влажностью — 5.

Кроме того, предусматриваются дополнительные категории размещения:

а) изделия, хранящиеся в процессе эксплуатации в помещениях категории 4 и работающие как в условиях категории 4, так и (кратковременно) в других условиях, в том числе и на открытом воздухе,— 1.1;

б) помещения с кондиционированием или частичным кондиционированием воздуха — 4.1;

в) помещения лабораторные, капитальные жилые или другие подобного рода — 4.2.

Количественно климатические факторы характеризуются нормальными, номинальными, рабочими и предельными значениями. *Нормальные* — это уточненные для использования в технике, естественно изменяющиеся значения климатических факторов в пределах данной географической зоны с учетом места размещения конденсатора; *номинальные* — нормируемые в нормативно-технической документации значения (естественно изменяющиеся или неизменные), при которых обеспечивается нормальная эксплуатация конденсаторов; *рабочие* — естественно изменяющиеся или неизменные значения климатических факторов, обеспечивающие сохранение требуемых номинальных

параметров и экономически целесообразных сроков службы конденсаторов; *предельные* — значения климатических факторов, при которых конденсаторы могут (редко и не более 6 ч) оказываться в эксплуатации и должны при этом: а) сохранять работоспособность, но могут не сохранять при этом требуемой точности номинальных параметров; б) после прекращения их действия восстанавливать требуемую точность и номинальные параметры.

Длительность воздействия климатических и механических (вибрации, тряски, удары, линейные нагрузки) факторов, а также методы испытаний устанавливаются в нормативно-технической документации в соответствии с действующими стандартами, а диапазоны изменения окружающей температуры для силовых конденсаторов различных температурных категорий — значениями в публикациях Международной электротехнической комиссии (МЭК), которые подробно рассматриваются в гл. 12.

Глава вторая

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В КОНДЕНСАТОРЕ

2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В СЕКЦИИ И МЕТОДЫ ЕГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Напряженность электрического поля является основным фактором, определяющим удельные характеристики или расход материалов и габариты (см. § 1.6), а также ресурс (см. гл. 10) конденсатора. Конфигурация и напряженность поля в секции определяются формой и взаимным расположением токоведущих элементов (обкладки, токоотводы), значением приложенного напряжения U_c, конструктивными параметрами диэлектрика (толщина диэлектрика, обкладок и токоотводов, геометрия обкладок и токоотводов), а также электрофизическими свойствами составляющих диэлектрик материалов. В плоском конденсаторе с бесконечно большими обкладками и гомогенным и изотропным диэлектриком поле однородно, и напряженность его в любой точке равна:

$$E = U_c / d. \quad (2.1)$$

Диэлектрическая система реальной секции также является плоской, но она гетерогенна, так как составляется из компонентов с различными электрофизическими параметрами и, кроме того, имеет конечные размеры. Конечность размеров обусловливает возникновение искажений поля у краев обкладок

вследствие краевого эффекта, а наличие вкладного токоотвода увеличивает область искажения поля за счет возникновения искажений у его краев. Области искажения поля сравнительно невелики по размерам, и за их пределами поле может считаться приближенно однородным, хотя и здесь также возможны его искажения, обусловленные неоднородностью структуры материалов вследствие несовершенства методов их изготовления и наличия токопроводящих и диэлектрических включений. При наличии нескольких различных материалов в диэлектрике напряженности поля между ними распределяются в соответствии с их электрофизическими параметрами: абсолютными диэлектрическими проницаемостями ε_a на переменном и удельными объемными сопротивлениями ρ_v на постоянных напряжениях, т. е. поле в диэлектрике конденсаторной секции неоднородно. Несмотря на это, практически удобно оценивать его напряженность в такой системе по формуле, аналогичной (2.1), средней расчетной напряженностью, к которой относятся все характеристики изоляции:

$$E=U_c/d_c, \qquad (2.2)$$

где $d_c=d_т$ — расчетная толщина диэлектрика.

Согласно (1.2) $d=d_т/k$, и тогда напряженность с учетом k

$$E'=U_c k/d_c=kE. \qquad (2.3)$$

Напряженности, выражаемые (2.2) и (2.3), в отличие от напряженности, выражаемой (2.1), являются чисто расчетными. По ним могут быть определены действительные напряженности поля в компонентах многокомпонентного диэлектрика. Поле в секции может рассматриваться как плоскопараллельное (двумерное). Увеличение напряженности поля в зоне краевого эффекта приводит, помимо прочего, к увеличению запасаемой энергии в объеме этой зоны по сравнению с равновеликим объемом в однородном поле. Поскольку напряжение между обкладками остается неизменным, увеличение запасаемой энергии в этой зоне может быть эквивалентировано увеличением емкости (при напряженности однородного поля) зоны краевого эффекта, называемой краевой емкостью, и эквивалентная емкость конденсатора, определяемая по запасаемой энергии, как бы становится больше его геометрической. Для реальной секции силового конденсатора это увеличение невелико и им можно пренебречь, но при малых емкостях оно может быть заметным.

В литературе имеется довольно большое число разнообразных методов расчета электростатических полей: конформных отображений, эквивалентных зарядов, изображений в круге, плоскости или сфере, интегральных уравнений Ламе (при зависимости потенциала от одного параметра), сеток, в том числе и с использованием ЭВМ, и др. Однако наиболее важные и ценные практические результаты, которые широко

используются при исследованиях электрического поля в секции силового конденсатора и на основе которых получаются зависимости, связывающие конструктивные и электрофизические параметры диэлектрика с напряженностью электрического поля в наиболее нагруженных его областях и используемые при расчетах, проектировании и оптимизации изоляции конденсаторов, получены с использованием метода конформных отображений [2.1—2.12]. Ниже рассматриваются расчеты напряженности поля для различных конфигураций обкладок с использованием этого метода. Область исследуемого поля, имеющая форму многоугольника со сторонами в виде отрезков прямых, конформно отображается на область однородного поля, напряженность которого легко определяется. По напряженности однородного поля находится напряженность неоднородного поля в данной точке. Отношение напряженности неоднородного поля к напряженности однородного называется коэффициентом искажения поля. Иногда приходится выполнять несколько отображений. Для задач силового конденсатостроения достаточно двух: при первом верхняя полуплоскость отображается на область исследуемого поля, при втором она отображается на бесконечную полосу — поле плоского конденсатора с бесконечными обкладками, являющееся однородным, напряженность которого определяется по (2.1). В дальнейшем будем обозначать плоскость искомого поля через $z=x+iy$, а все относящиеся к нему величины индексом z, верхнюю полуплоскость через $t=\zeta+i\eta$ и соответственно индексом t, третью плоскость через $w=u+iv$ и индексом w. Отображающие функции будем обозначать через $z=f(t)$ и $w=\varphi(t)$ (см. Приложение).

Абсолютная диэлектрическая проницаемость в дальнейшем используется в форме $\varepsilon_i=\varepsilon_0\varepsilon_{ri}$, где $\varepsilon_0=10^{-9}/36\pi=8{,}854\cdot10^{-12}$ Ф/м $=8{,}854$ пФ/м — электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума); ε_{ri} — относительная диэлектрическая проницаемость i-го компонента. Там, где это не будет вызывать недоразумений, слово «относительная» будет опускаться.

2.2. ПОЛЕ В СЕКЦИИ У КРАЕВ БЕСКОНЕЧНО ТОНКИХ ОБКЛАДОК

Рассмотрим заданное в плоскости $z=x+iy$ поле на краю плоского конденсатора (секции) с бесконечно тонкими обкладками, расстояние между которыми равно d (рис. 2.1, *а*). Эта задача решена В. Роговским еще в 1923 г. Ввиду симметрии относительно линии, делящей диэлектрик пополам, можно рассматривать только одну половину поля, например верхнюю, т. е. многоугольник $ABCD$ с вершинами C и D в бесконечности, ограниченный полуплоскостью и плоскостью, представляющими бесконечно тонкие обкладки. Рассматривается пространство

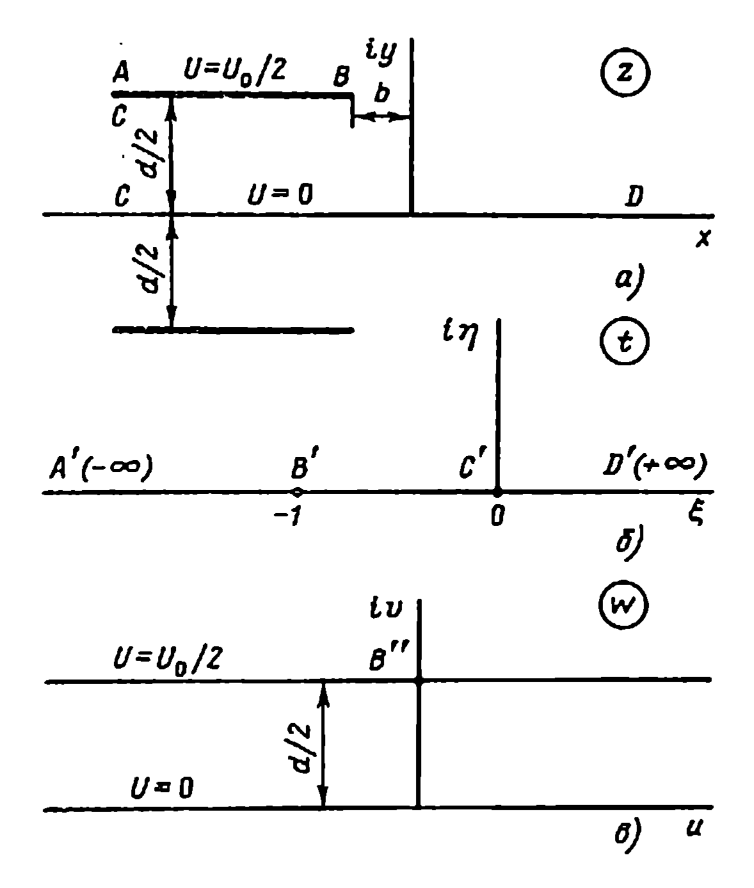


Рис. 2.1. К расчету поля у края секции с бесконечно тонкими скрытыми обкладками

внутри и вне этого многоугольника. Отобразим конформно заданное поле на верхнюю полуплоскость плоскости $t=\zeta+i\eta$, так чтобы (рис. 2.1, *б*) точке *A* плоскости *z* соответствовала точка *A'* в плоскости *t* с координатой $\zeta=-\infty$, точке *B* — точка *B'* с $\zeta=-1$, точке *C* — точка *C'* с $\zeta=0$ и точке *D* — точка *D'* с $\zeta=+\infty$. Углы при вершинах многоугольника находятся из следующих соображений: чтобы попасть на сторону *BC*, продолжение стороны *AB* нужно повернуть вокруг точки *B* на угол π по часовой стрелке, т. е. $\mu_B=-1$ ($\alpha_B=2$), где α_B — внутренний угол вершины *B*, выраженный в долях π; μ_B — угол, дополняющий α_B до π и выраженный также в долях π; в вершине *C* продолжение стороны *BC* нужно повернуть вокруг точки *C* на угол π против часовой стрелки, чтобы попасть на сторону *CD*, т. е. $\mu_C=1$ ($\alpha_C=0$), и производная отображающей функции для данного случая имеет вид

$$dz/dt=C(t+1)/t, \tag{2.4}$$

интегрируя которую, получаем отображающую функцию

$$z(t)=C(t+\ln t)+C_1. \tag{2.5}$$

Заменяя в выражении производной $t=\rho\exp i\varphi$ и $dt=i\rho\exp i\varphi d\varphi$ и затем интегрируя его по окружности бесконечно

малого радиуса, проведенной вокруг точки $t=0$ в пределах от $\varphi=0$ до $\varphi=\pi$, имеем

$$z(0)=C\int_0^\pi \frac{\rho\exp(i\varphi)+1}{\rho\exp i\varphi}\, i\rho\exp(i\varphi)\,d\varphi=i\pi C. \qquad (2.5\text{а})$$

Из соответствия точек C и C' находим, что переходу с правой стороны на левую в плоскости t соответствует переход с нижней обкладки на верхнюю в плоскости z, т. е.

$$z(0)=id/2. \qquad (2.5\text{б})$$

Из формул (2.5а) и (2.5б) находим $C=d/2\pi$. Постоянная C_1 находится из соответствия точек B с координатой $z=b+id/2$ и B' с координатой $t=-1$. Подставляя в выражение для отображающей функции $t=-1$ и учитывая, что $\ln(-1)=i\pi$, после приравнивания получаем

$$b+id/2=d/2\pi+id/2.$$

Выбирая начало координат в плоскости z так, чтобы $b=-d/2\pi$, получаем $C_1=0$, и теперь

$$z(t)=\frac{d}{2\pi}(t+\ln t). \qquad (2.6)$$

Найдем функцию, отображающую поле верхней полуплоскости плоскости t на бесконечную полосу шириной $d/2$ в плоскости w. Для отображаемой фигуры в плоскости t имеем $\alpha_\kappa=0$, $\mu_\kappa=1$, вершина имеет $a=0$ (рис. 2.1, *в*) и производная отображающей функции будет иметь вид

$$(dw/dt)=C/t. \qquad (2.7)$$

Постоянная C находится аналогично изложенному выше интегрированием (2.7) после замены в нем t по окружности бесконечно малого радиуса, проведенной вокруг точки $t=0$ в пределах от $\varphi=0$ до $\varphi=\pi$, чему в плоскости w соответствует переход с нижней обкладки на верхнюю. В результате получим $C=d/2\pi$. Расположим координатные оси в плоскости w так (рис. 2.1, *в*), чтобы ось iv проходила через точку B''. Тогда из соответствия точек B' и B'' имеем при $t=-1$ $w=id/2$ и $C_1=0$; окончательно будем иметь

$$w=(d/2\pi)\ln t. \qquad (2.8)$$

Напряженность поля в плоскости w $E_w=E_0=U_0/d$. Как доказывается в теории конформных отображений, модуль напряженности E_z заданного в плоскости z поля связан с модулем напряженности E_w соотношением

$$(E_z/E_w)=|(dw/dt)|/|(dz/dt)|. \qquad (2.9)$$

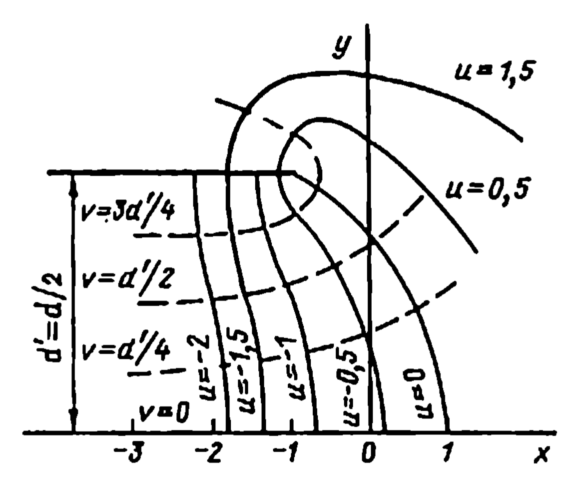


Рис. 2.2. Поле у края секции с бесконечно тонкими обкладками

Подставляя (2.4) и (2.7) после замены в них значений C в (2.9) и преобразуя, находим

$$E_z = E_0/(t+1). \qquad (2.10)$$

Отношение $E_z/E_0 = k_E$, представляющее коэффициент искажения поля, при $t \to -1$ возрастает, и при $t=-1$ $k_E=\infty$. Точка $t=-1$ соответствует острому краю обкладки, и напряженность на краю обкладки будет наибольшей. При удалении от края обкладки поле стремится к однородному.

Выражая из (2.8) t и подставляя его в (2.6), получаем

$$z(w) = w + (d/2\pi)\exp(2\pi w/d). \qquad (2.11)$$

Эта функция отображает заданное в плоскости z поле на однородное поле в плоскости w. Заменяя в (2.11) $z=x+iy$ и $w=u+iv$, после преобразований находим

$$x = (d/2\pi)\exp(2\pi u/d)\cos(2\pi v/d) + u; \qquad (2.12а)$$

$$y = (d/2\pi)\exp(2\pi u/d)\sin(2\pi v/d) + v. \qquad (2.12б)$$

С помощью полученных соотношений можно построить эквипотенциали и линии поля, как это показано на рис. 2.2, задаваясь значениями u при $v=\text{const}$ и соответственно v при $u=\text{const}$.

Определим форму электродов, при которых $E_z \leqslant E_0$ (см. также Приложение). Для решения задачи воспользуемся выражением (2.9), подставив в которое значения производных, заменив $w=u+iv$ и определив модуль, получим

$$E_z = \frac{E_0}{\sqrt{1+2\exp(2\pi u/d)\cos(2\pi v/d)+\exp(4\pi u/d)}}. \qquad (2.13)$$

Изменение E_z вдоль эквипотенциали описывается формулой (2.13) при $v=\text{const}$. Дифференцируя подкоренное выражение знаменателя по u и приравнивая нулю, находим условие экстремума E_z в виде

$$\exp(2\pi u/d)\cos(2\pi v/d) + \exp(4\pi u/d) = 0, \qquad (2.14)$$

или

$$\exp(2\pi u/d) = -\cos(2\pi v/d). \qquad (2.15)$$

Так как вторая производная положительна, условие (2.15) соответствует минимуму знаменателя и максимуму E_z. Поскольку $\exp(2\pi u/d)>0$, условие (2.15) выполняется только при $(\pi/2)\leqslant(2\pi v/d)\leqslant\pi$ или $d/4\leqslant v\leqslant d/2$. Преобразуя подкоренное выражение (2.13) с учетом (2.15) к виду $(1-\cos 2\pi v/d)^2$ и подставляя $v=d/4$, получаем $E_z=E_0$, т. е. если обкладки имеют форму эквипотенциали, соответствующей условию $0\leqslant(2\pi v/d)\leqslant\pi/2$, то $E_z\leqslant E_0$ (электроды Роговского).

2.3. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В СЕКЦИИ

В расчетах § 2.2 не учитывается влияние на электрическое поле в секции конструктивных факторов — толщины обкладок и токоотводов и др. Ниже рассматривается их влияние на электрическое поле в секции.

Влияние толщины обкладок. При конечной толщине $d_ф$ обкладок (фольги) поле у их краев будет различным в зависимости от расположения витков в секции. В средних витках каждая обкладка находится между двумя другими противоположной ей полярности (рис. 2.3, *а*). В начальном витке внутренняя, а в конечном — наружная обкладки не имеют второй, симметрирующей, обкладки (рис. 2.3, *б*). В расчетах, приведенных ниже, в отличие от расчетов в [2.1, 2.2] изменено расположение координат в плоскости z, что позволяет упростить конечные выражения. Конформные отображения аналогичны показанным на рис. 2.1.

Для первого случая (рис. 2.3, *а*) напряженности неоднородного E_z и однородного E_0 полей связаны соотношением (вывод см. в [2.2])

$$E_z=E_0\frac{d}{d+d_ф}\frac{1}{\sqrt{t^2-\alpha^2}}, \qquad (2.16)$$

в котором $1-\alpha^2=d^2/(d+d_ф)^2$.

Находя значение α, подставляя его в (2.16) и вводя обозначение $d/d_ф=\xi$, получаем

$$E_z=E_0/\sqrt{[(1+\xi)/\xi]^2(t^2-1)+1}. \qquad (2.17)$$

Формула (2.17) позволяет оценить влияние соотношения толщин диэлектрика d и обкладки $d_ф$ на коэффициент искажения поля k_E. При уменьшении $d_ф$ (увеличении ξ) k_E стремится к значению при бесконечно тонкой обкладке, так как при $d_ф=0$ ($\xi=\infty$) точки C и D (рис. 2.3, *а*) сливаются с точкой 0, и выражение (2.17) принимает вид

$$E_z=E_0/t,$$

аналогичный (2.10).

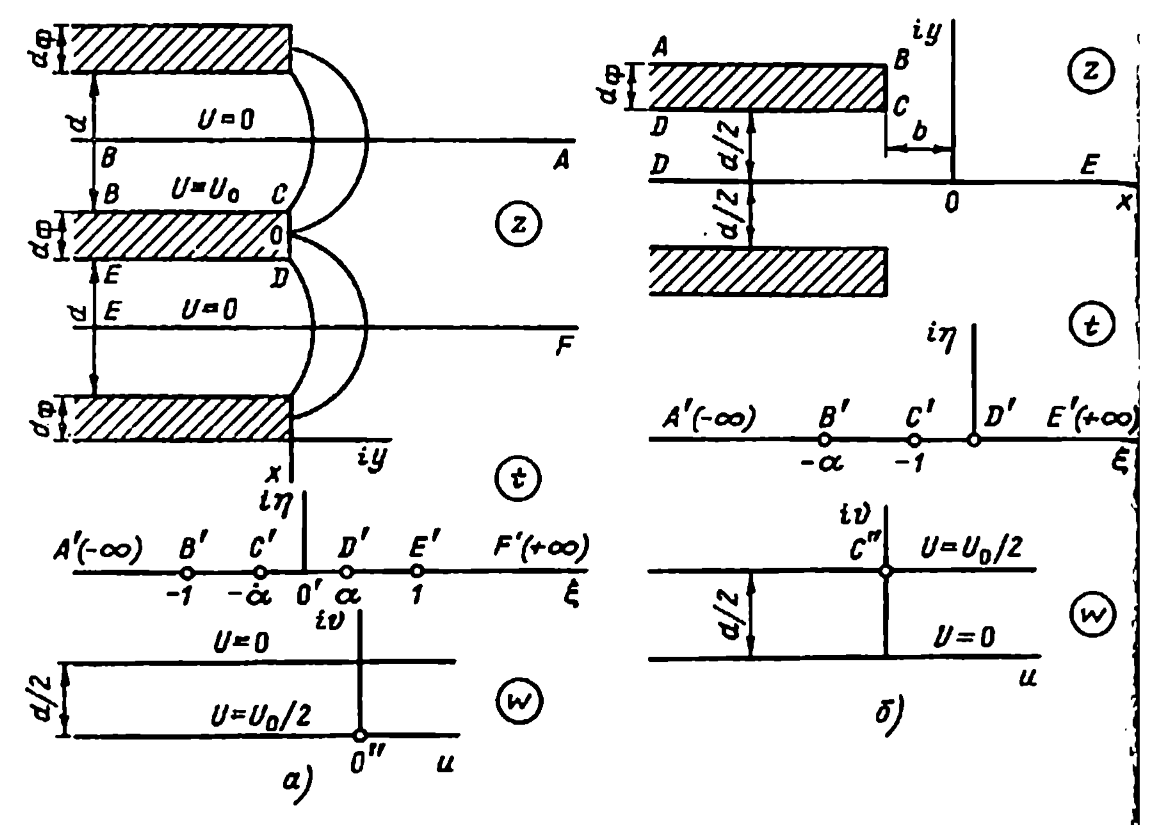


Рис. 2.3. К расчету поля у края секции со скрытыми обкладками конечной толщины

С увеличением $d_ф$ (уменьшением ξ) напряженность в диэлектрике E_z уменьшается. Функция $E_z=E_z(\xi)$ не имеет экстремума. Как показано в [2.7], с увеличением $d_ф$ емкость конденсатора увеличивается, что особенно заметно у конденсаторов малой емкости.

Для второго случая (рис. 2.3, *б*) (вывод см. в [2.2])

$$E_z=E_0\frac{\sqrt{\alpha(\xi)}}{\sqrt{t^2+[\alpha(\xi)+1]\,t+\alpha(\xi)}}, \qquad (2.18)$$

где

$$\alpha(\xi)=\left[(\xi+2)/\xi+\sqrt{[(\xi+2)/\xi]^2-1}\,\right]^2.$$

При $d_ф=0$ ($\xi=\infty$) точка B сливается с точкой C и (2.18) принимает вид $E_z=E_0/(t+1)$, аналогичный (2.10).

Влияние сдвига обкладок. При намотке секций края обкладок могут сдвигаться относительно друг друга, как это показано на рис. 2.4, на котором приведены и все обозначения. Величину сдвига обкладок будем выражать в виде λd, где $0\leqslant\lambda\leqslant\infty$ — безразмерный параметр. Решение этой задачи выполнено в [2.3] и дополнено в [2.8], из которого решение Роговского следует как частный случай. Напряженность E_z связана с на

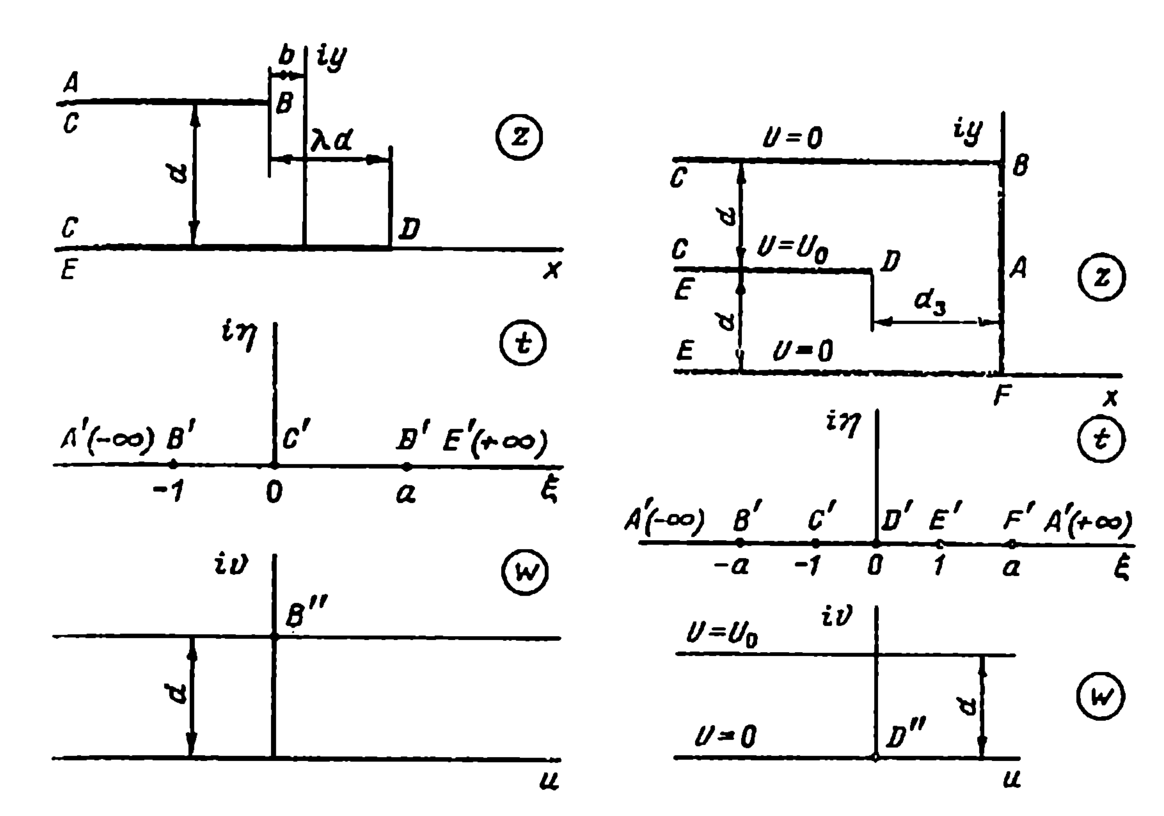


Рис. 2.4. К расчету поля при сдвиге обкладок

Рис. 2.5. К расчету поля в секции с выступающими обкладками

пряженностью однородного поля E_0 соотношением (вывод аналогичен выводу в § 2.2)

$$E_z = E_0 \bigg/ \left(1 + \frac{a-1}{a} t - \frac{1}{a} t^2\right), \tag{2.19}$$

в котором

$$\lambda\pi = \ln a + (a^2 - 1)/(2a); \tag{2.20}$$

$$t = \exp(\pi w/d). \tag{2.21}$$

Подставляя в (2.19) значение t из (2.21) с заменой $w = u + iv$, после преобразований получаем

$$E_z = E_0/[\varphi(a, u, iv)], \tag{2.22}$$

где

$$\varphi(a, u, iv) = 1 + \frac{a-1}{a} \exp\frac{\pi u}{d} \cos\frac{\pi v}{d} -$$

$$-\frac{1}{a} \exp\frac{2\pi u}{d} \cos\frac{2\pi v}{d} + i\left(\frac{a-1}{a} \exp\frac{\pi u}{d} \sin\frac{\pi v}{d} -\right.$$

$$\left.-\frac{1}{a} \exp\frac{2\pi u}{d} \sin\frac{2\pi v}{d}\right).$$

Коэффициент искажения поля $k_E = 1/\varphi(a, u, iv)$ зависит от a, характеризующего сдвиг обкладок. Наибольшее значение функция $\varphi(a, u, iv)$ принимает при $a=\infty$, при котором сомножитель $(a-1)/a=1$ и $(1/a)=0$. При $a=1$ функция $\varphi(a, u, iv)$ имеет наименьшее значение. Это значит, что коэффициент искажения поля в секции со сдвигом обкладок меньше, чем в секции без сдвига. При малых сдвигах (малых a) коэффициент искажения поля в секции со сдвигом близок к его значению в секции без сдвига.

Если известны уравнения линий поля $x=x(u, v)$ и $y=y(u, v)$, то можно найти тангенс угла наклона $\operatorname{tg}\beta$ вектора напряженности к оси x в любой точке силовой линии:

$$\operatorname{tg}\beta=(\partial y/\partial v)/(\partial x/\partial v),$$

а по нему — тангенциальную (вдоль слоев диэлектрика) составляющую напряженности, появление которой нежелательно, поскольку электрическая прочность его в этом направлении много ниже, чем в направлении, перпендикулярном слоям. Уравнения линий поля могут быть получены для рассматриваемого случая аналогично изложенному в § 2.2. Их анализ показывает, что сдвиг обкладок увеличивает тангенциальную составляющую поля (см. Приложение).

Поле в секции с выступающими обкладками. Такая система показана на рис. 2.5. Расчет ее поля выполнен в [2.4]. В данном расчете в отличие от расчета в [2.4] изменено расположение осей координат в плоскости z, что упрощает конечные выражения. Соотношение между E_z и E_0, полученное с помощью метода конформных отображений, имеет вид (вывод см. в [2.4])

$$E_z = E_0 \frac{\sqrt{\operatorname{ch}^2(\pi d_s/2d)-t^2}}{t\operatorname{sh}(\pi d_s/2d)}. \qquad (2.23)$$

Из (2.23) можно оценить влияние ширины закраины d_s на коэффициент искажения поля.

Искажение поля токоотводом. Наличие вкладного токоотвода создает дополнительные зоны искажения поля в диэлектрике. В литературе этот вопрос исследован недостаточно. На рис. 2.6 показано расположение обкладок и токоотвода и приведены все обозначения. Ввиду симметрии относительно оси z, перпендикулярной плоскости токоотвода и делящей его ширину пополам, можно рассматривать только одну половину, т. е. внутренность многоугольника $ABCDE$. Используя метод конформных отображений, получаем (см. Приложение).

$$E_z = E_0\sqrt{(t-a)/(t-1)}, \qquad (2.24)$$

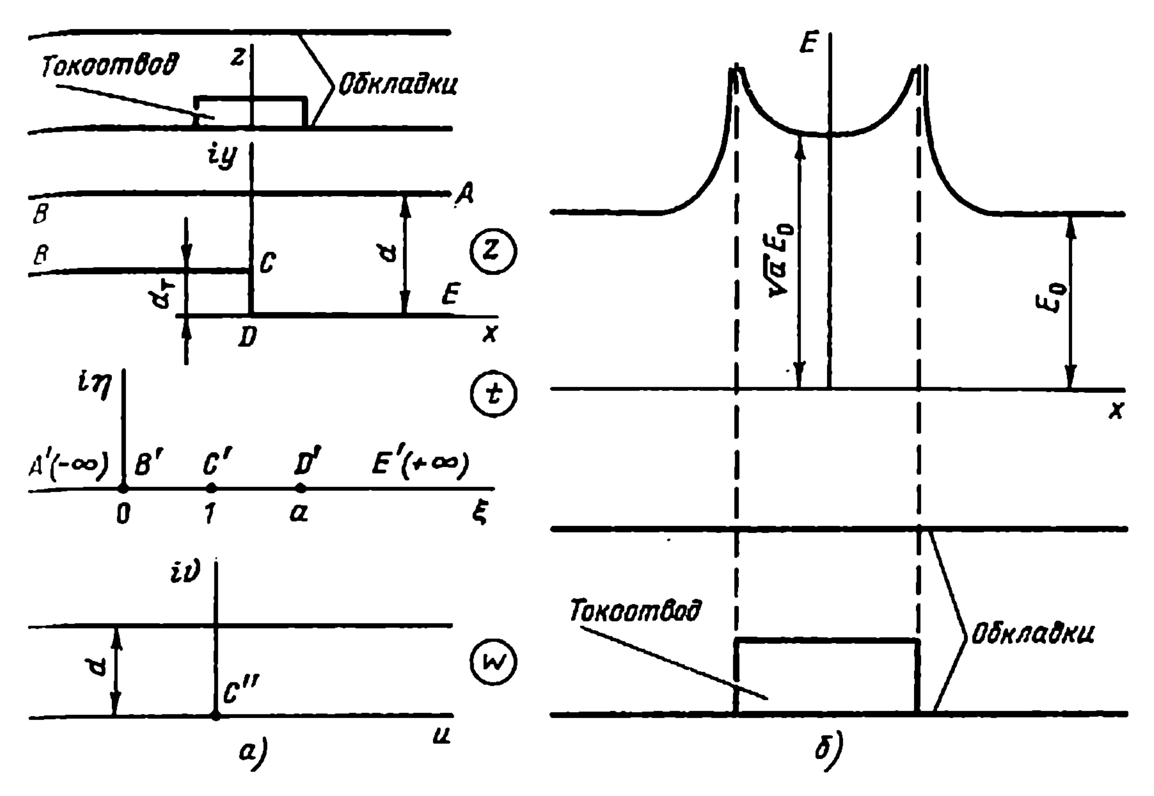


Рис. 2.6. К расчету искажения поля токоотводом (*а*) и его распределение в зоне токоотвода (*б*)

где $a=d^2/(d-d_т)^2$; $d_т$ — толщина токоотвода и $t=\exp(\pi w/d)$.

Подставив значение t в (2.24), заменив в нем $w=u+iv$ и найдя модуль, получим коэффициент искажения поля:

$$k_E=\sqrt{\frac{[\exp(\pi u/d)-a\cos(\pi v/d)]^2+[a\sin(\pi v/d)]^2}{[\exp(\pi u/d)-\cos(\pi v/d)]^2+\sin^2(\pi v/d)}}. \qquad (2.25)$$

Из (2.25) следует, что k_E возрастает с увеличением a или, что то же самое, с увеличением $d_т$. С увеличением u (при $u>0$) слагаемое $\exp(\pi u/d)$ быстро увеличивается, и уже при $u=2d$ можно пренебречь по сравнению с ним слагаемыми $a\sin(\pi v/d)$ и $a\cos(\pi v/d)$, тогда $E_z=E_0$, т. е. поле становится однородным. Для значений $u<0$ (в пространстве над токоотводом) слагаемое $\exp(-\pi u/d)$ с возрастанием численного значения u быстро уменьшается, и уже при $u=-2d$ им можно пренебречь по сравнению со слагаемыми $a\sin(\pi v/d)$ и $a\cos(\pi v/d)$, т. е. при $u=-2d$ поле становится однородным и равным:

$$E_z=\sqrt{a}\,E_0. \qquad (2.26)$$

Над токоотводом поле хотя и однородно, но напряженность его выше, чем в других точках однородного поля секции.

2.4. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ ВБЛИЗИ ОСТРОЙ КРОМКИ ОБКЛАДКИ

На острой кромке обкладки напряженность $E=\infty$ и не может быть использована для количественной оценки. Поэтому она определяется в окрестности кромки на достаточно малом расстоянии ρ от нее ($\rho \ll d$), где она конечна. В табл. 2.1 приведены все типы полей, встречающиеся в силовом конденсаторостроении, для которых ниже приводятся основные положения ее расчета.

Для поля типа 1 рассматривается окрестность точки B с координатой

$$z=-(d/2\pi)+\rho+id/2 \tag{2.27}$$

Таблица 2.1. Формулы для определения напряженностей электрического поля вблизи острой кромки обкладки с наибольшей напряженностью

Тип поля	$E_{z\rho}$	a_i
1	$E_{z\rho}=E_0\sqrt{\frac{d}{4\pi\rho}}$; $\rho \ll d$	—
2	$E_{z\rho}=E_0\sqrt{\frac{d}{2\pi\rho}}$; $\rho \ll d$	—
3	$E_{z\rho}=E_0\sqrt{\frac{d}{\pi\rho}}$; $\rho \ll d$	—
4	$E_{z\rho}=E_0\sqrt{\frac{d}{2\pi\rho}}\sqrt{\frac{a_4}{1+a_4}}$; $\rho \ll d$	$\lambda\pi=\ln a_4+\frac{a_4^2-1}{2a_4}$

Тип поля	$E_{зр}$	a_i
5 $U=0$ U_0 d $d_з$ B d $U=0$	$E_{зр}=E_0\sqrt{\frac{d}{\pi\rho}}\sqrt{\frac{a_б}{\sqrt{a_б^2-1}}}$; $\rho\ll d$; $d\ll d_з$	$a_б=\operatorname{ch}\frac{\pi d_з}{2d}$
6 U_0 B ε_{a1} d ε_{a2} $U=0$	$E_{зр}=E_0\sqrt{\frac{d}{2\pi\rho}}\sqrt{\frac{2\varepsilon_r}{\varepsilon_{r1}+\varepsilon_{r2}}}$; $\rho\ll d$	—
7 U_0 $d_ф$ B d $U=0$	$E_{зр}=E_0\sqrt[3]{\frac{2d}{3\pi\rho}}\sqrt[3]{\frac{a_1}{a_1-1}}$; $\rho\ll d$; $\rho\ll d_ф$	$a_1=\left[1+d_ф/d+\sqrt{(1+d_ф/d)^2-1}\right]^2$
8 $d_ф$ U_0 B d B $d_ф$ $U=0$	$E_{зр}=E_0\sqrt[3]{\frac{d}{3\pi\rho}}\sqrt[3]{\frac{a_3}{a_3-1}}$; $\rho\ll d$; $\rho\ll d_ф$	$a_3=\left[1+\frac{2d_ф}{d}+\sqrt{\left(1+\frac{2d_ф}{d}\right)^2-1}\right]^2$
9 $d_ф$ d $U=0$ $d_ф$ B U_0 B d $U=0$ $d_ф$	$E_{зр}=E_0\sqrt[3]{\frac{d}{3\pi\rho}}\sqrt[3]{\frac{1}{a_2}}$; $\rho\ll d$; $\rho\ll d_ф$	$a_2=\sqrt{1-\frac{1}{\left(1+\frac{d_ф}{d}\right)^2}}$

Тип поля	$E_{z\rho}$	a_i
10 [рисунок: U_0, d, d_T, B, $U=0$]	$E_{z\rho}=E_0\sqrt[3]{\frac{2(d-d_T)}{3\pi\rho}}\times$ $\times\sqrt[3]{\frac{a-1}{a}}$; $\rho\ll d$; $\rho\ll d_T$	$a=\left(\frac{d}{d-d_T}\right)^2$

($\rho\ll d/2$), которой в окрестности точки B' на плоскости t соответствует точка с координатой

$$t=-1+\delta. \qquad (2.28)$$

В (2.27) и (2.28) ρ и δ являются переменными и $dz=d\rho$, а $dt=d\delta$. На основании (2.4) производная отображающей функции при $\delta\ll 1$ будет иметь вид

$$\frac{dz}{dt}=\frac{d\rho}{d\delta}=\frac{d}{2\pi}\frac{t+1}{t}=\frac{d}{2\pi}\frac{\delta}{\delta-1}. \qquad (2.29)$$

Так как значение ρ мало по сравнению с d, то и δ мало по сравнению с 1. Тогда выражение (2.29) принимает вид

$$d\rho/d\delta=-\delta d/2\pi. \qquad (2.30)$$

После интегрирования (2.30) находим

$$\rho=-\frac{d}{2\pi}\int_0^\delta \delta d\delta=-\frac{d}{2\pi}\frac{\delta^2}{2}. \qquad (2.31)$$

Формула (2.10) с учетом (2.28) может быть преобразована к виду

$$E_{z\rho}=E_0/|\delta|. \qquad (2.32)$$

Из (2.31) имеем

$$|\delta|=\sqrt{4\pi\rho/d}. \qquad (2.33)$$

Подставляя (2.33) в (2.32), получаем

$$E_{z\rho}=E_0\sqrt{d/(4\pi\rho)}=U_0/(2\sqrt{\pi\rho d}). \qquad (2.34)$$

Из (2.34) следует, что при $U_0=\text{const}$ и $\rho=\text{const}$ $E_{z\rho}=A/\sqrt{d}$, т. е. изменяется обратно пропорционально $\sqrt{d}$, а при $E_0=U_0/d=\text{const}$ и $\rho=\text{const}$ $E_{z\rho}=A\sqrt{d}$, т. е. изменяется пропорционально $\sqrt{d}$.

Для поля типа 2 рассматривается окрестность точки B. Наибольшая напряженность в нем возникает вблизи острой кромки верхней обкладки вблизи точки B, при этом $E_{z\rho}$ может

быть определена по формуле, аналогичной (2.34), с учетом того, что плоскость $U=0$ в поле 2 является средней плоскостью симметрии поля 1. Для определения $E_{z\rho}$ поля 2 в (2.34) необходимо заменить U_0 на $2U_0$ и d на $2d$, при этом

$$E_{z\rho}=E_0\sqrt{d/(2\pi\rho)}=U_0/\sqrt{2\pi\rho d}. \qquad (2.35)$$

Сравнение формул (2.34) и (2.35) показывает, что при одинаковых напряжениях между обкладками U_0 и одинаковых толщинах диэлектрика d напряженность $E_{z\rho}$ в поле 2 в $\sqrt{2}$ раз больше, чем в поле 1.

Для поля типа 3 рассматривается окрестность точки B, вблизи которой возникает наибольшая напряженность, равная:

$$E_{z\rho}=E_0\sqrt{d/\pi\rho}=U_0/\sqrt{\pi\rho d}. \qquad (2.36)$$

Сравнение (2.36) с (2.34) и (2.35) показывает, что если при неизменной толщине диэлектрика обкладка с потенциалом U_0 находится между обкладками с потенциалом $U=0$, то напряженность в точке B возрастает в 2 раза по сравнению с полем 1 и в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с полем 2.

Для поля типа 4 рассматривается окрестность точки B, у которой возникает наибольшая напряженность [2.3]:

$$E_{z\rho}=E_0\sqrt{d/(2\pi\rho)}\sqrt{a/(1+a)} \qquad (2.37)$$

[связь между параметрами a и λ см. (2.20)]. При отсутствии сдвига $\lambda=0$, $a=1$ и (2.37) соответствует (2.35).

Для поля типа 5 наибольшая напряженность возникает в окрестности точки B и равна [2.4]:

$$E_{z\rho}=E_0\sqrt{d/(\pi\rho)}\sqrt{a_6/\sqrt{a_6^2-1}}. \qquad (2.38)$$

В формуле (2.38) $a_6=\operatorname{ch}\pi d_з/2d$. Из нее следует, что только очень малые значения $d_з$, соизмеримые с толщиной диэлектрика d, оказывают существенное влияние на коэффициент искажения поля.

Поле типа 6 представляет случай, когда одна обкладка (на рис. 2.7 верхняя) находится на границе раздела диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями ε_{a1} и ε_{a2}. Примером может являться слой твердого (ε_{a1}) и жидкого (ε_{a2}) диэлектриков или слои различных твердых диэлектриков, например конденсаторной бумаги и полимерной пленки. В этом случае наибольшая напряженность будет в окрестности точки B [2.10]:

$$E_{z\rho}=E_0\sqrt{d/(2\pi\rho)}\sqrt{2\varepsilon_{a1}/(\varepsilon_{a1}+\varepsilon_{a2})}. \qquad (2.39)$$

При $\varepsilon_{a1}=\varepsilon_{a2}$ (2.39) соответствует (2.35). Как следует из (2.39), с ростом ε_{a2} значение $E_{z\rho}$ уменьшается. Это обстоятельство целесообразно учитывать при выборе расположения

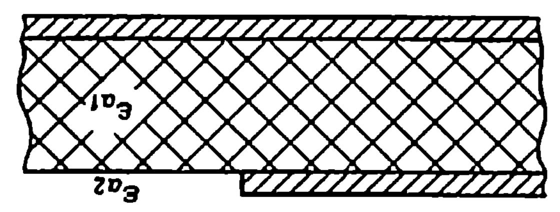


Рис. 2.7. Диэлектрик с обкладками в другой диэлектрической среде

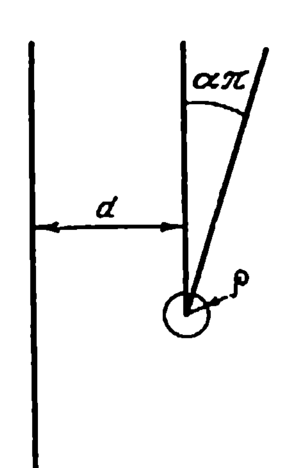


Рис. 2.8. Обкладка с острой кромкой над бесконечной плоскостью

диэлектрических слоев с различными диэлектрическими проницаемостями.

Для полей типов 7—9 наибольшие напряженности имеют место в окрестностях точек *B*. Формулы для расчета $E_{z\rho}$ с учетом $d_ф$ приведены в табл. 2.1.

Поле типа 10 соответствует наличию токоотвода. Наибольшая напряженность поля возникает в нем в окрестности точки *B* и равна:

$$E_{z\rho}=E_0\sqrt[3]{2(d-d_т)/3\pi\rho}\sqrt[3]{(a-1)/a}. \qquad (2.40)$$

Значение *a* дано к пояснениям к формуле (2.24).

Поле на рис. 2.8 [2.12] образуется обкладкой с острой кромкой с углом раскрытия $\alpha\pi$ $(0\leqslant\alpha\leqslant\pi)$, расположенной над обкладкой в виде бесконечной плоскости. Наибольшая напряженность будет у острого угла кромки:

$$E_\rho=U_0k(\alpha,\ \rho)d^{-1/(2-\alpha)}=E_0k(\alpha,\ \rho)d^{(1-\alpha)/(2-\alpha)}. \qquad (2.41)$$

При $\alpha=0$ формула (2.41) соответствует (2.30), в которой E_ρ при $E_0=\text{const}$ изменяется пропорционально $\sqrt{d}$. При $\alpha=0,5$ и $E_0=\text{const}$ E_ρ изменяется пропорционально $\sqrt[3]{d}$.

Глава третья

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ДИЭЛЕКТРИКЕ СИЛОВОГО КОНДЕНСАТОРА

3.1. НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ В КОМПОНЕНТАХ ДИЭЛЕКТРИКА

В многокомпонентном конденсаторном диэлектрике напряженности поля в его компонентах, определяемые их электрофизическими параметрами и средней напряженностью поля

в диэлектрике, различны. Различия в свойствах компонентов диэлектрика материалов определяют и различные предельно допустимые значения напряженностей поля в каждом из них. Оценка напряженностей поля в компонентах дает основу для выбора рабочей напряженности поля в диэлектрике. Определяющим при этом будет компонент, в котором предельно допустимое значение напряженности поля будет наименьшим по сравнению с другими компонентами.

При переменном напряжении напряженности поля в компонентах при однородном поле в общем случае пропорциональны их комплексным удельным сопротивлениям. Практически влиянием сквозной проводимости можно пренебречь, положив $\rho_v=\infty$, и тогда напряженность поля в любом компоненте диэлектрика с последовательным расположением компонентов может быть вычислена по известной формуле

$$E_{l\sim}=\frac{E_{\sim}d}{\varepsilon_{rl}\sum\limits_{j=1}^{n}(d_j/\varepsilon_{rj})}=\frac{E_{\sim}d}{\varepsilon_{rl}\sigma_{\varepsilon}}, \tag{3.1}$$

где $\sigma_{\varepsilon}=\sum\limits_{j=1}^{n}(d_j/\varepsilon_{rj})$; ε_{rj} и d_j $(j=1,\ 2,\ \ldots,\ n)$ — соответственно относительная диэлектрическая проницаемость и толщина j-го компонента; d — суммарная толщина диэлектрика; $E_{\sim}=U_{\sim}/d$ — расчетная напряженность поля; $U_{\sim}$ — приложенное напряжение.

Используя (3.1), для напряженностей поля в клетчатке $E_{к}$, пленке $E_{п}$ и пропитывающей жидкости $E_{ж}$ (см. рис. 1.3) при расчетной напряженности $E_{0\sim}=U_{\sim}/d$ имеем

$$\left.\begin{aligned} E_{k\sim}&=\beta E_{0\sim}/\Psi_{\varepsilon};\\ E_{п\sim}&=\varepsilon_{aж}E_{0\sim}/\varepsilon'_{aп}\Psi_{\varepsilon};\\ E_{ж\sim}&=E_{0\sim}/\Psi_{\varepsilon}; \end{aligned}\right\} \tag{3.2}$$

здесь

$$\Psi_{\varepsilon}=\varkappa\left[1-k\gamma(1-\beta)/\gamma_{к}\right]+(1-\varkappa)\left[1-kk_{d}(1-\varepsilon_{aж}/\varepsilon'_{aп})\right], \tag{3.3}$$

где k_d — коэффициент увеличения толщины пленки при ее набухании; $\beta=\varepsilon_{aж}/\varepsilon_{aк}$; $\varkappa=nd_1/(nd_1+n'd'_1)$; $1-\varkappa=n'd'_1/(nd_1+n'd'_1)$; n — число листов бумаги толщиной d_1; n' — число листов пленки толщиной d'_1; k — коэффициент запрессовки; γ и $\gamma_{к}$ — плотности бумаги и клетчатки.

Формула (3.3) получена при использовании формул (8.1а), (8.1б) и (8.6). Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon'_{aп}$ и толщина $d'_{п}$ относятся к набухшей пленке (см. § 5.7). Из формул (3.2) при $\varkappa=1$ и $\varkappa=0$ следуют формулы для расчета напряженностей в компонентах бумажного и пленочного диэлектриков. На переменном напряжении вектор смещения

в многокомпонентном диэлектрике имеет одно и то же значение в каждом компоненте: $D=\varepsilon_0\varepsilon_{rj}E_{j\sim}=\text{const}$. Поэтому напряженности распределяются между компонентами обратно пропорционально их диэлектрическим проницаемостям, что следует также и из (3.1) и (3.2). В пропитанном бумажном диэлектрике при $\varepsilon_{aж}<\varepsilon_{aк}$ наибольшая напряженность при переменном напряжении будет в жидкости, и с увеличением плотности бумаги она будет увеличиваться. В бумажно-пленочном диэлектрике при $\varepsilon'_{aп}<\varepsilon_{aк}$ и $\varepsilon'_{aп}<\varepsilon_{aж}$ наибольшая напряженность возникает в пленке. С изменением коэффициента запрессовки при $E_0=\text{const}$ изменяется напряженность поля в одном и том же соотношении. С изменением ε_a любого компонента изменяется распределение напряженностей между ними.

При постоянном напряжении, как это следует из закона непрерывности тока, плотности тока J в каждом компоненте многокомпонентного диэлектрика одинаковы, т. е. $J=E_j/\rho_j=\text{const}$, и напряженности поля между компонентами распределяются пропорционально их удельным объемным сопротивлениям. На основании этого связь между расчетной напряженностью на постоянном напряжении E_0 и параметрами диэлектрика имеет вид (j — номер компонента)

$$E_j=\rho_j E_0 d/(k\sigma_\rho),$$

где $\sigma_\rho=\sum_{j=1}^{n}\rho_j d_j$; ρ_j — удельное сопротивление j-го компонента; d_j — его толщина.

Для системы на рис. 1.3 после подстановки в (3.4а) значений $d_к$, $d_п$ и $d_ж$ из (8.1а), (8.1б) и (8.6) получим

$$\left.\begin{aligned} E_к&=\rho_к E_0/(\Psi_\rho);\\ E_п&=\rho_п E_0/(\Psi_\rho);\\ E_ж&=\rho_ж E_0/(\Psi_\rho),\end{aligned}\right\} \qquad (3.4)$$

в которых по аналогии с (3.3)

$$\Psi_\rho=\varkappa\left[\rho_ж+\frac{k\gamma}{\gamma_к}(\rho_к-\rho_ж)\right]+(1-\varkappa)\left[\rho_ж+kk_d(\rho_п-\rho_ж)\right].$$

Поскольку $\rho_ж<\rho_к$ и $\rho_ж<\rho_п$, при постоянном напряжении напряженность поля в прослойках жидкости диэлектрика будет наименьшей. В комбинированном диэлектрике наибольшая напряженность будет в пленке.

Если диэлектрик работает при смешанном напряжении, содержащем переменную и постоянную составляющие, действующее значение напряженности в его компонентах равно сумме постоянной и действующего значения переменной составляющих:

$$\left.\begin{aligned} E_{\text{к.см}} &= \beta E_{0\sim}/\Psi_c + \rho_\text{к} E_0/(k\Psi_\rho); \\ E_{\text{п.см}} &= \varepsilon_{a\text{ж}} E_{0\sim}/(\varepsilon'_{a\text{п}}\Psi_\varepsilon) + \rho_\text{п} E_0/(k\Psi_\rho); \\ E_{\text{ж.см}} &= E_{0\sim}/\Psi_\varepsilon + \rho_\text{ж} E_0/(k\Psi_\rho). \end{aligned}\right\} \quad (3.5)$$

Наибольшее значение амплитуды напряженности в компоненте при смешанном напряжении равно сумме напряженностей от постоянной и амплитудного значения от переменной составляющих.

3.2. ИСКАЖЕНИЯ ПОЛЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

Причинами появления искажений поля в диэлектрике помимо рассмотренных выше могут быть как неоднородности в структуре самих составляющих диэлектрик материалов, так и наличие в них посторонних включений из материалов, отличающихся по своим свойствам (различных диэлектрических и токопроводящих включений), газовых пузырей в жидкости. В реальном бумажном листе хаотичность расположения волокон клетчатки обусловливает появление локальных искажений поля, определяемых геометрией пор. Неоднородности структуры бумаги будут сказываться тем резче, чем больше различаются между собой диэлектрические проницаемости клетчатки $\varepsilon_{a\text{к}}$ и пропитывающей жидкости $\varepsilon_{a\text{ж}}$. При $\varepsilon_{a\text{к}}=\varepsilon_{a\text{ж}}$ искажений не будет. В литературе имеются аналитические решения для некоторых простейших включений. Ниже приводится формула для расчета напряженностей при включениях шаровой формы. Форму шара принимает газовое включение в жидкости.

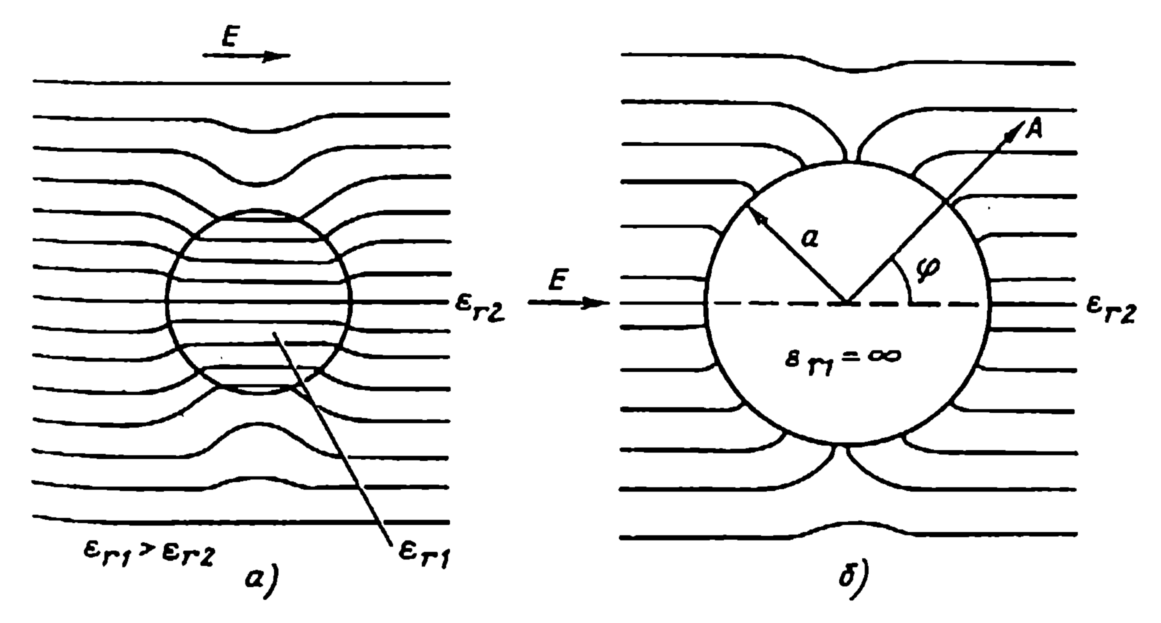


Рис. 3.1. Диэлектрический шар (*а*) и проводящий шар (*б*) в однородном поле

Если шар с диэлектрической проницаемостью ε_{a1} поместить в среду с диэлектрической проницаемостью ε_{a2}, поле в которой до внесения шара было однородным и равным E, то напряженность поля в шаре (рис. 3.1, *а*)

$$E_1 = E 3\varepsilon_{a2}/(2\varepsilon_{a2}+\varepsilon_{a1}). \qquad (3.6)$$

Из (3.6) следует, что при $\varepsilon_{a1} < \varepsilon_{a2}$ имеем $E_1 > E$, и наоборот. Если шар металлический, то $\varepsilon_{a1} = \infty$ и наибольшая напряженность будет на его поверхности (рис. 3.1, *б*):

$$E_1 = 3E\cos\varphi, \qquad (3.7)$$

где φ — угол, образуемый вектором напряженности поля E и радиусом-вектором, проведенным из центра шара в точку, напряженность поля E_1 в которой вычисляется.

3.3. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В МНОГОКОМПОНЕНТНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЕГО ПОД НАПРЯЖЕНИЕ

При включении многокомпонентного диэлектрика, содержащего компоненты с различными электрофизическими параметрами и, следовательно, с различными собственными постоянными времени $\tau_j = \rho_j \varepsilon_0 \varepsilon_{rj}$, под напряжение, в ходе переходного процесса, когда напряжение на нем растет, происходит перераспределение напряженностей поля между компонентами, распределение которых между ними в этот период описывается формулой (3.1) независимо от того, на какое напряжение включается диэлектрик — постоянное или переменное. По окончании переходного процесса, в установившемся состоянии, распределение напряженностей между компонентами определяется родом напряжения (см. § 3.2). Хотя собственные постоянные времени компонентов различны, процесс перераспределения напряженностей между ними происходит по одной и той же общей для всех компонентов постоянной времени τ независимо от рода напряжения, определяемой свойствами твердых материалов. Для трехкомпонентного диэлектрика (рис. 1.3)

$$\tau = \varepsilon_0 \varepsilon_{r\text{к}} \varepsilon_{r\text{п}} \rho_\text{к} \rho_\text{п} \sigma_t / \sigma_\rho. \qquad (3.8)$$

Используя закон непрерывности полного тока, можно получить уравнения изменения в переходном процессе мгновенных значений напряженностей поля в компонентах. Для трехкомпонентной системы (рис. 3.1) при включении ее на переменное напряжение они имеют вид (t — время, $i = \sqrt{-1}$)

$$\left.\begin{aligned}
E_{к\sim} &= U_m\left[A_{к1}\exp(-t/\tau)+D_{к1}\exp i\omega t\right]+\\
&+i\omega U_m\left[A_{к2}\exp(-t/\tau)+D_{к2}\exp i\omega t\right];\\
E_{п\sim} &= U_m\left[A_{п1}\exp(-t/\tau)+D_{п1}\exp i\omega t\right]+\\
&+i\omega U_m\left[A_{п2}\exp(-t/\tau)+D_{п2}\exp i\omega t\right];\\
E_{ж\sim} &= U_m\left[A_{ж1}\exp(-t/\tau)+D_{ж1}\exp i\omega t\right]+\\
&+i\omega U_m\left[A_{ж2}\exp(-t/\tau)+D_{ж2}\exp i\omega t\right],
\end{aligned}\right\} \qquad (3.9)$$

где

$$A_{к1}=\frac{1}{\varepsilon_{rк}\sigma_\varepsilon}-\frac{1+\omega^2\tau\tau_п}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_к}{\sigma_\rho};\quad D_{к1}=\omega\frac{\tau-\tau_п}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_к}{\sigma_\rho};$$

$$A_{к2}=\frac{1+\omega^2\tau\tau_п}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_к}{\sigma_\rho};\quad D_{к2}=-\frac{\tau-\tau_п}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_к}{\sigma_\rho};$$

$$A_{п1}=\frac{1}{\varepsilon'_{rп}\sigma_\varepsilon}-\frac{1+\omega^2\tau\tau_к}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_п}{\sigma_\rho};\quad D_{п1}=\omega\frac{\tau-\tau_к}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_п}{\sigma_\rho};$$

$$A_{п2}=\frac{1+\omega^2\tau\tau_к}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_п}{\sigma_\rho};\quad D_{п2}=-\frac{\tau-\tau_к}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_п}{\sigma_\rho};$$

$$A_{ж1}=\frac{1}{\varepsilon_{rж}\sigma_\varepsilon}-\frac{1+\omega^2\tau\tau_к\tau_п/\tau_ж}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_ж}{\sigma_\rho};\quad D_{ж1}=\omega\frac{\tau-\tau_к\tau_п/\tau_ж}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_ж}{\sigma_\rho};$$

$$A_{ж2}=\frac{1+\omega^2\tau\tau_к\tau_п/\tau_ж}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_ж}{\sigma_\rho};\quad D_{ж2}=-\frac{\tau-\tau_к\tau_п/\tau_ж}{1+(\omega\tau)^2}\frac{\rho_ж}{\sigma_\rho};$$

здесь $\tau_к$, $\tau_п$, $\tau_ж$ — соответственно постоянные времени слоев клетчатки, пленки и жидкости.

Как видно из (3.9), напряженности поля в компонентах являются величинами комплексными. Коэффициенты A_j и D_j являются величинами вещественными, зависящими от параметров компонентов. Подставляя в (3.9) значение $\omega=0$, получаем законы изменения напряженностей в компонентах в переходном процессе при постоянном напряжении

$$\left.\begin{aligned}
E_к &= B_к U\exp(-t/\tau)+F_к U;\\
E_п &= B_п U\exp(-t/\tau)+F_п U,\\
E_ж &= B_ж U\exp(-t/\tau)+F_ж U,
\end{aligned}\right\} \qquad (3.10)$$

в которых

$$B_к=(\sigma_\rho-\varepsilon_{rк}\rho_к\sigma_\varepsilon)/\varepsilon_{rк}\sigma_\rho\sigma_\varepsilon;\quad F_к=\rho_к/\sigma_\rho;$$

$$B_п=(\sigma_\rho-\varepsilon'_{rп}\rho_п\sigma_\varepsilon)/\varepsilon'_{rп}\sigma_\rho\sigma_\varepsilon;\quad F_п=\rho_п/\sigma_\rho;$$

$$B_ж=(\sigma_\rho-\varepsilon_{rж}\rho_ж\sigma_\varepsilon)/\varepsilon_{rж}\sigma_\rho\sigma_\varepsilon;\quad F_ж=\rho_ж/\sigma_\rho.$$

В (3.10) U — постоянное напряжение. Законы изменения напряженностей в компонентах $E_{к.см}$, $E_{п.см}$ и $E_{ж.см}$ при включении

на смешанное напряжение, содержащее переменную и постоянную составляющие, получим, просуммировав для одних и тех же компонентов (3.9) и (3.10):

$$E_{к.см}=(A_{к1}U_m+B_кU)\exp(-t/\tau)+D_{к1}U_m\exp i\omega t+ \\ +i\omega U_m[A_{к2}\exp(-t/\tau)+D_{к2}\exp i\omega t]+F_кU; \quad (3.11а)$$

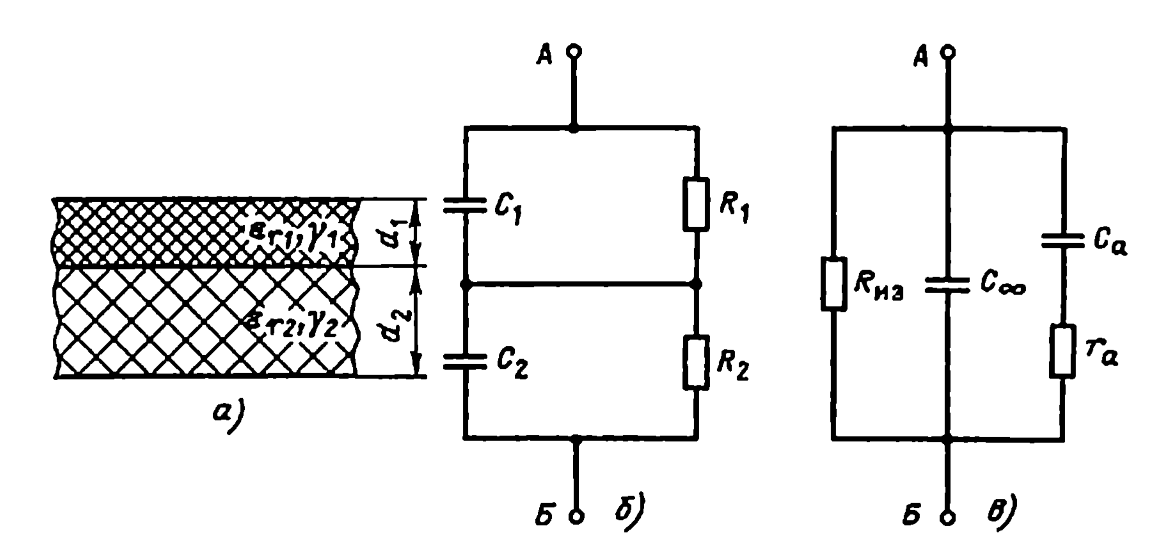
$$E_{п.см}=(A_{п1}U_m+B_пU)\exp(-t/\tau)+D_{п1}\exp i\omega t+ \\ +i\omega U_m[A_{п2}\exp(-t/\tau)+D_{п2}\exp i\omega t]+F_пU; \quad (3.11б)$$

$$E_{ж.см}=(A_{ж1}U_m+B_жU)\exp(-t/\tau)+D_{ж1}\exp i\omega t+ \\ +i\omega U_m[A_{ж2}\exp(-t/\tau)+D_{ж2}\exp i\omega t]+F_жU. \quad (3.11в)$$

Аналогично могут быть получены уравнения переходного процесса и для двухкомпонентной системы. Из изложенного следует, что процесс установления поля в компонентах многокомпонентного диэлектрика происходит с одной и той же, общей для всех компонентов постоянной времени независимо от рода приложенного напряжения. При равенстве постоянных времени компонентов переходный процесс отсутствует.

3.4. АБСОРБЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В КОНДЕНСАТОРНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

В слоистом конденсаторном диэлектрике помимо основных процессов поляризации со временем установления $t<10^{-5}$ с, определяющих геометрическую емкость конденсатора C_∞, существует еще миграционная поляризация, приводящая к накоплению свободных зарядов (главным образом, медленно движущихся ионов, источником которых являются ионные загрязнения в нем) на границе раздела слоев с различными проводимостями и в приэлектродных областях. Этот процесс называется абсорбцией, а сами заряды — абсорбционными зарядами. Время установления абсорбции может составлять десятки и более минут, поэтому наибольшей она будет на постоянном напряжении, поскольку за половину периода переменного напряжения не успевает накопиться сколь-нибудь значительное количество зарядов. При смешанном напряжении процесс абсорбции зависит от соотношения между постоянной и переменной составляющими. Наиболее сильно абсорбция проявляется у конденсаторов с бумажным и бумажно-пленочным диэлектриками и значительно снижает эффективность импульсных конденсаторов при использовании их в качестве накопителей энергии, а в отключенных от источников питания высоковольтных конденсаторах приводит к появлению опасного для жизни высокого напряжения.



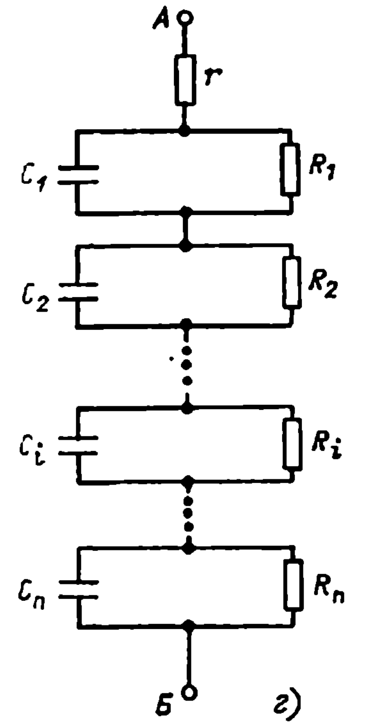


Рис. 3.2. Схемы замещения двух- и многослойного диэлектрика с абсорбцией

Рассмотрим двухслойный диэлектрик (рис. 3.2, *а*), слои которого не содержат каких-либо включений. Схема замещения его приведена на рис. 3.2, *б*, где R_1, R_2, C_1, C_2 — активные сопротивления и емкости слоев, выражаемые через их параметры. При приложении к диэлектрику постоянного напряжения U_0 накапливаемые слоями заряды равны:

$$\left.\begin{aligned} q_1 &= U_1 C_1 = U_0 R_1 C_1/(R_1+R_2); \\ q_2 &= U_2 C_2 = U_0 R_2 C_2/(R_1+R_2). \end{aligned}\right\} \quad (3.12)$$

Если $q_1 \neq q_2$, то между слоями накапливается абсорбционный заряд $q_а$, равный:

$$q_а = |q_1 - q_2| = U_0 |R_1 C_1 - R_2 C_2| / (R_1 + R_2). \quad (3.13)$$

Наиболее простая схема замещения конденсатора с абсорбцией показана на рис. 3.2, *в*, где C_∞ — герметическая и $C_а$ — эквивалентирующая абсорбцию емкости; $R_{из}$ — сопротивление изоляции; $r_а$ — активное сопротивление, определяющее постоянную времени абсорбции. Эта схема применима для конденсаторов с любым видом диэлектрика. Для двухкомпонентного диэлектрика $C_\infty = C_1 C_2/(C_1+C_2)$; $R_{из} = R_1 + R_2$, а из равенства полных сопротивлений схем на рис. 3.2, *б* и *в*

$$C_а = \frac{(R_1C_1 - R_2C_2)^2}{(R_1+R_2)^2(C_1+C_2)}; \quad r_а = \frac{R_1R_2(R_1+R_2)(C_1+C_2)}{(R_1C_1 - R_2C_2)^2}.$$

Если $R_1C_1 = R_2C_2 = (\varepsilon_{a1}/\gamma_1) = (\varepsilon_{a2}/\gamma_2)$, то $r_а = \infty$ и $C_а = 0$, т. е. абсорбция отсутствует.

Пусть конденсатор с абсорбцией заряжен до напряжения U_0. Замкнем на некоторое время $t_р$ его обкладки накоротко (точнее — на очень малое сопротивление). Емкость C_∞ разрядится очень быстро (практически мгновенно), и заряд, и напряжение на ней будут равны нулю. Емкость $C_а$ из-за большой постоянной времени $\tau_а = r_а C_а$ за это время практически совсем не разрядится и полностью сохранит свой первоначальный заряд $q_а$. Если через время $t_р$ обкладки снова разомкнуть, то заряд из $C_а$ начнет переходить в C_∞, и на конденсаторе восстанавливается напряжение $U_а$, называемое напряжением абсорбции. Вначале оно возрастает и достигает максимального значения $U_{ам}$, при котором напряжения на емкостях C_∞ и $C_а$ уравниваются:

$$(q'/C_\infty) = (q'_а/C_а) = U_{ам}, \qquad (3.14)$$

где $q'_а$ — заряд, оставшийся в емкости $C_а$; q' — заряд, перешедший из $C_а$ в C_∞, затем оно снижается вследствие саморазрядки конденсатора (рис. 3.3).

На участке снижения напряжения на C_∞ и $C_а$ остаются одинаковыми. Количественно явление абсорбции оценивается коэффициентом абсорбции $k_а$, определяемым через напряжение абсорбции $U_а$:

$$k_а = U_а/U_0. \qquad (3.15)$$

Эта величина не является однозначной характеристикой явления абсорбции и зависит от многих параметров: времени зарядки $t_з$ и разрядки $t_р$ конденсатора; времени $t_а$, прошедшего с момента размыкания обкладок до момента измерения $U_а$; температуры, с увеличением которой абсорбция увеличивается, и др. Величины $t_з$, $t_р$ и $t_а$ являются случайными, а зависимость $k_а$ от них — сложной [3.1—3.3 и др.]. Несмотря на все его

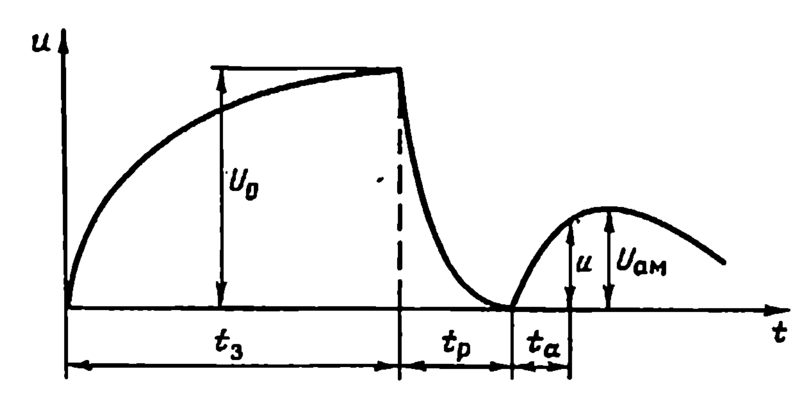


Рис. 3.3. Протекание процесса восстановления абсорбционного напряжения во времени

несовершенство, коэфициент абсорбции позволяет оценить абсорбционные характеристики конденсатора. При максимальном напряжении абсорбции $U_{а.м}$ он будет наибольшим и называется предельным коэффициентом абсорбции $k_{а.п}$. Учитывая, что $q_а = q'_а + q'$ и $q'_а = U_{а.м} C_а$, из (3.15) для $k_{а.п}$ получаем

$$k_{а.п} = (q'_а / q_а) = (U_{а.м} / U_0) = C_а / (C_а + C_\infty). \qquad (3.16)$$

Помимо восстанавливающегося напряжения для оценки абсорбционных свойств конденсатора может быть использован метод термостимулированной деполяризации (ТСД) [3.3]. Измеряя ток во внешней цепи замкнутого на измерительный прибор конденсатора при его нагреве (обычно с постоянной скоростью), по площади кривой ТСД определяют значение $q_а$. Этим методом можно получить также информацию о природе абсорбционного заряда и рассчитать время его релаксации при повышенных температурах. В [3.4] для оценки абсорбционных свойств конденсатора использовалось явление саморазряда. При определении $k_{а.п}$ по (3.16) полная емкость $C_\infty + C_а$ может быть определена методом зарядки конденсатора на постоянном напряжении, а C_∞ — мостовым методом на звуковой частоте [3.3]. Их разность дает значение $C_а$.

Напряжение абсорбции в многослойном диэлектрике может быть определено аналитически с помощью эквивалентной схемы, аналогичной схеме рис. 3.2, *б*, уточненной введением в нее включаемого последовательно сопротивления обкладок и токоведущих частей r (см. рис. 3.2, *г*). Исходные уравнения при заряде напряжением U_0 имеют вид [3.3]

$$\left.\begin{aligned} &(dq_j/dt) + (q_j/\tau_j) = i; \\ &\sum_{j=1}^{n} (q_j/C_j) + ir = U_0, \end{aligned}\right\} \qquad (3.17)$$

где i — ток через конденсатор; $\tau_j = R_j C_j$ — постоянная времени, а R_j и C_j — сопротивление и емкость и q_j — заряд j-го слоя; n — число слоев.

Решение (3.17) при $t_з \to \infty$ дает уравнения для токов $i_з$ зарядки $(U_0 \neq 0)$ и $i_р$ разрядки $(U_0 = 0)$ в виде

$$\left.\begin{aligned} &i_з = \sum_k A_k \exp(-t/\vartheta_k) + i_\infty, \\ &i_р = -\sum_{k=1}^{n} A_k \exp(-t/\vartheta_k); \\ &q_j = \sum_j A_{jk} \exp(-t/\vartheta_k) + q_{\infty j}, \end{aligned}\right\} \qquad (3.18)$$

где $i_\infty = U_0/R$; $q_{\infty j} = U_0 \tau_j / R$; $R = r + \sum_{j=1}^{n} R_j$.

При неполной зарядке конденсатора $(t=t_з)$

$$i_р=-\sum_{k=1}^{n} A_k[1-\exp(-t_з/\vartheta_k)]\exp(-t/\vartheta_k).$$

Времена релаксации ϑ_j определяются из характеристического уравнения $\sum_{j=1}^{n}\left[R_j/(\vartheta-\tau_j)\right]+r/\vartheta=0$, а коэффициенты A_k — решением системы линейных уравнений

$$\sum_{k=1}^{n} A_k\tau_j\vartheta_k/(\vartheta_k-\tau_j)=-q_{\infty j}=-U_0\tau_j/R$$

при $A_{jk}=A_k\tau_j\vartheta_k/(\vartheta_k-\tau_j)$.

При саморазряде $(i=0)$ исходные уравнения имеют вид

$$dq_j/dt+q_j/\tau_j=0;\quad \sum_{j=1}^{n} q_j/C_j=u(t).$$

Решая их, находим

$$u(t)=\sum_{j=1}^{n}(B_j/C_j)\exp(-t/\tau_j);\quad q_j=B_j\exp(-t/\tau_j). \qquad (3.19)$$

При саморазряде после полной зарядки $(t_з\to\infty)\,B_j=U_0\tau_j/R$ и

$$u(t)/U_0=(1/R)\sum_{j=1}^{n}R_j\exp(-t/\tau_j), \qquad (3.20)$$

а при саморазряде после неполной зарядки $(t=t_з)$

$$u(t)=-\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}A_k[R_j\vartheta_k/(\vartheta_k-\tau_j)][1-\exp(-t_з/\vartheta_k)]\exp(-t/\tau_j). \qquad (3.21)$$

Восстанавливающееся напряжение после полной зарядки конденсатора и последующего замыкания обкладок на время $t_р$ определяется уравнением

$$u_в(t)=-\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}[A_kR_j\vartheta_k/(\vartheta_k-\tau_j)]\exp(-t_р/\vartheta_k)\exp(-t/\tau_j). \qquad (3.22)$$

Все параметры в (3.22) связаны с параметрами слоев.

Глава четвертая

ПОЛЯРИЗАЦИЯ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ДИЭЛЕКТРИКЕ КОНДЕНСАТОРА

4.1. ПОЛЯРИЗАЦИЯ В ДИЭЛЕКТРИКЕ КОНДЕНСАТОРА

Наложение электрического поля на диэлектрик вызывает его поляризацию. По протеканию времени различают устанавливающуюся практически мгновенно (или безынерционно, за время 10^{-12}—10^{-15} с) электронную или ионную поляризацию, практически не сопровождаемую рассеянием энергии, и релаксационную поляризацию, устанавливающуюся за значительно большее время и сопровождаемую рассеянием энергии. Протекание ее во времени происходит по экспоненциальному закону. Существует несколько видов или механизмов релаксационной поляризации, каждый имеет свою постоянную времени τ_j, определяемую природой и свойствами материала. В неполярных диэлектриках имеет место безынерционная поляризация, в полярных — безынерционная и один или несколько механизмов релаксационной поляризации. Процесс поляризации электрически может быть эквивалентирован зарядкой емкости, а его инерционность — включением последовательно с ней активного сопротивления, равного нулю в случае безынерционной поляризации. Число таких rC-цепочек или релаксаторов, параметры которых r_j и C_j в общем случае являются функциями частоты, равно числу механизмов релаксационной поляризации в данном диэлектрике, и соединяются они параллельно с емкостью C_0, эквивалентирующей безынерционную поляризацию. Схемы замещения приведены на рис. 4.1, где R_0—сопротивление изоляции. Значения r_j и C_j подбираются так, чтобы их произведение $r_jC_j=\tau_j$ было равно действительной постоянной времени данного механизма, а энергия, рассеиваемая в r_j, была равна рассеиваемой им энергии.

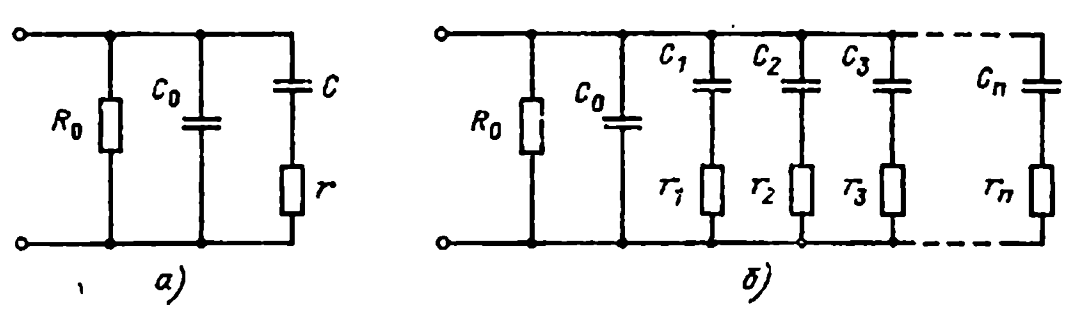


Рис. 4.1. Схемы замещения диэлектрика с различными механизмами поляризации:

а — однорелаксаторная; б — многорелаксаторная

Поляризованность диэлектрика

$$F=\sigma_{\text{св}}=\sigma_{\text{св}\infty}+\sum_{j=1}^{n}\sigma_{\text{св}j}=F_{\infty}+\sum_{j=1}^{n}F_j, \qquad (4.1)$$

где $\sigma_{\text{св}}$ — поверхностная плотность связанных зарядов; $\sigma_{\text{св}\infty}$ и F_{∞} — соответственно плотность связанных зарядов и частичная поляризованность, обусловленные ее безынерционными видами; $\sigma_{\text{св}j}$ и F_j — то же от j-го вида релаксационной поляризации.

Применяемые в силовом конденсаторостроении материалы являются изотропными и линейными, и для них справедливы соотношения

$$F_{\infty}=\varepsilon_0 k_{\infty}E \text{ и } F_j=\varepsilon_0 k_j E,$$

после подстановки которых в (4.1) выражение для электрического смещения будет иметь вид

$$D=\varepsilon_0 E+F=\varepsilon_0 E+\varepsilon_0 k_{\infty}E+\sum_{j=1}^{n}\varepsilon_0 k_j E= \\ =\varepsilon_0\left(1+k_{\infty}+\sum_{j=1}^{n}k_j\right)E=\varepsilon_0\varepsilon_{rc}E, \qquad (4.2)$$

где

$$\varepsilon_{rc}=1+k_{\infty}+\sum_{j=1}^{n}k_j$$

есть статическая относительная диэлектрическая проницаемость, переходящая при всех $k_j=0$ в оптическую:

$$\varepsilon_{r\infty}=1+k_{\infty}.$$

Оптическая относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{r\infty}$ характеризует диэлектрики с практически мгновенно устанавливающейся поляризацией, т. е. неполярные. Статическая относительная диэлектрическая проницаемость ε_{rc} характеризует диэлектрики с релаксационной поляризацией, т. е. полярные диэлектрики. Ее значение соответствует такому состоянию диэлектрика, когда поляризация в нем достигла установившегося состояния. Коэффициенты k_{∞} и k_j представляют собой диэлектрические восприимчивости материала соответственно по безынерционной и j-му виду релаксационной поляризаций. Они зависят от природы и структуры материала и являются функциями его молекулярных параметров. Для материалов с одним релаксатором (рис. 4.1, *а*) с постоянной времени $\tau=rC$ зависимость их поляризации от времени $F(t)$ при синусоидально изменяющейся напряженности поля $E_m=\sin(\omega t+\varphi)$ имеет вид [4.1]

$$F(t)=\varepsilon_0(\varepsilon_{r\infty}-1)E_m\sin(\omega t+\varphi)+\varepsilon_0\frac{\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty}}{1+(\omega\tau)^2}E_m[\sin(\omega t+\varphi)-$$
$$-\omega\tau\cos(\omega t+\varphi)]. \tag{4.3а}$$

Для данного случая $\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty}=k$, и тогда

$$F(t)=\varepsilon_0(\varepsilon_{rc}-1)E_m\sin(\omega t+\varphi)+\varepsilon_0\frac{k}{1+(\omega\tau)^2}E_m\sin(\omega t+\varphi)-$$
$$-\varepsilon_0\omega\{k\tau/[1+(\omega\tau)^2]\}E_m\cos(\omega t+\varphi). \tag{4.3б}$$

Первые слагаемые в (4.3а) и (4.3б) представляют долю поляризации, обусловленную ее безынерционными видами, последующие — инерционными. При наличии в материале n релаксаторов доля инерционной поляризации равна сумме поляризаций, создаваемых каждым релаксатором, и для этого случая (4.3б) будет иметь вид

$$F(t)=\varepsilon_0(\varepsilon_{r\infty}-1)E_m\sin(\omega t+\varphi)+\varepsilon_0\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j}{1+(\omega\tau_j)^2}E_m\sin(\omega t+\varphi)-$$
$$-\varepsilon_0\omega\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j\tau_j}{1+(\omega\tau_j)^2}E_m\cos(\omega t+\varphi). \tag{4.3в}$$

Эту формулу можно записать в виде

$$F(t)=\varepsilon_0(\varepsilon_{r\infty}-1)E_m\sin(\omega t+\varphi)+$$
$$+\varepsilon_0\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j}{1+(\omega\tau_j)^2}E_m\Bigg\{\sin(\omega t+\varphi)-$$
$$-\omega\left[\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j\tau_j}{1+(\omega\tau_j)^2}\Bigg/\sum_{j=1}^{n}\frac{k_j}{1+(\omega\tau_j)^2}\right]\cos(\omega t+\varphi)\Bigg\}. \tag{4.3г}$$

4.2. ЗАВИСИМОСТЬ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ПОТЕРЬ ОТ ЧАСТОТЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Под действием приложенного поля молекулы в неполярном диэлектрике поляризуются, становясь диполями с индуцированным дипольным моментом $\mu_и$, пропорциональным напряженности поля:

$$\vec{\mu}_и=\alpha\vec{E}, \tag{4.4}$$

где α — поляризуемость молекулы.

В полярном диэлектрике дипольный момент полярной молекулы $\vec{\mu}$ в общем случае равен векторной сумме собственного $\vec{\mu}_0$ и индуцированного $\vec{\mu}_и$ моментов:

$$\vec{\mu}=\vec{\mu}_0+\alpha\vec{E}. \tag{4.5}$$

Напряженности поля, создаваемого этими диполями, пропорциональны дипольному моменту и обратно пропорциональны кубу расстояния.

Для неполярных материалов обычно $\varepsilon_r = 2 \div 2{,}5$ и не зависит от частоты до $f \approx 10^{12}$ Гц. Зависимость ε_r от температуры обусловлена у них тем, что при ее изменении изменяются линейные размеры твердых и объемы жидких и газообразных диэлектриков, что изменяет число молекул n в единице объема и расстояния между ними. Используя известные из теории диэлектриков соотношения $F = n\mu_n$ и $F = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)E$, где F — поляризованность материала, для неполярных диэлектриков имеем

$$\varepsilon_r = 1 + n\mu_n/\varepsilon_0 E = 1 + n\alpha/\varepsilon_0. \tag{4.6}$$

При $E = \mathrm{const}$ также $\mu_n = \mathrm{const}$ и температурное изменение ε_r обусловлено только изменением n, которое является линейной функцией температуры Θ, зависимость $\varepsilon_r = \varepsilon_r(\Theta)$ также является линейной. Для полярных диэлектриков аналитических зависимостей нет, и обычно пользуются эмпирическими.

Удельная объемная проводимость $\gamma = 1/\rho_v$ практически также не зависит от частоты, но сильно зависит от температуры:

$$\gamma = A\exp(-B/T)/T \approx \gamma_0 \exp a(\Theta - \Theta_0), \tag{4.7}$$

где A, B, a — константы, не зависящие от температуры; T — температура, К (Θ — в °С); γ_0 — удельная электропроводность при $\Theta = 20°$ С. В диапазоне $20 < \Theta \leqslant 100°$ С значение γ изменяется на 1—2 порядка. При всех $\tau_i = 0$ из рис. 4.1 имеем уравнение

$$\mathrm{tg}\,\delta = \gamma/\omega C_0, \tag{4.8а}$$

из которого следует, что с увеличением ω величина $\mathrm{tg}\,\delta$ уменьшается.

Подставляя в (4.8а) значение γ из (4.7), получаем

$$\mathrm{tg}\,\delta = \mathrm{tg}\,\delta_0 \exp a(\Theta - \Theta_0), \tag{4.8б}$$

где $\mathrm{tg}\,\delta_0$ — значение при $\Theta = 20°$ С.

Для определения характера зависимости ε_r от частоты в полярном диэлектрике с одним видом релаксационной поляризации (рис. 4.1, a) воспользуемся формулой (4.3а). Умножая ее обе части на площадь обкладок S, учитывая, что на основании (4.2) плотность зарядов на обкладках плоского конденсатора $\sigma(t) = \varepsilon_0 E(t) + F_\text{л}(t)$ и $E_m = U_m/d$ (d — толщина диэлектрика) и используя (4.3а), имеем

$$\sigma(t)S = Q_\text{л}(t) = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{r\infty} S}{d} U_m \sin\omega t +$$

$$+\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty}}{d} S \frac{U_m}{1+(\omega\tau)^2} (\sin\omega t - \omega\tau\cos\omega t), \qquad (4.9)$$

где $Q_д(t)$ — заряд на обкладках конденсатора.

Дифференцируя (4.9) по t, находим ток смещения $i_c(t)$:

$$i_c(t)=\frac{dQ_д}{dt}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{r\infty}S}{d}\,\omega U_m\cos\omega t +$$

$$+\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty}}{d} S \frac{\omega U_m}{1+(\omega\tau)^2} (\cos\omega t + \omega\tau\sin\omega t). \qquad (4.10)$$

Одна составляющая

$$i_{cr}(t)=\left[\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{r\infty}S}{d}+\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty}}{d} S \frac{1}{1+(\omega\tau)^2}\right]\omega U_m\cos\omega t \qquad (4.11)$$

опережает напряжение на угол $\pi/2$ и представляет реактивную составляющую тока смещения, создающую реактивную мощность. Первый член характеризует безынерционную составляющую реактивного тока, второй — инерционную. Вторая составляющая

$$i_{ca}(t)=\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty}}{d} S \frac{\omega^2\tau}{1+(\omega\tau)^2} U_m\sin\omega t \qquad (4.12а)$$

совпадает по фазе с напряжением и представляет активную составляющую тока смещения, определяющую одну из составляющих потерь в диэлектрике.

Ток сквозной проводимости не зависит от частоты и изменяется в фазе с напряжением:

$$i_{ск}(t)=S/(\rho_v d)\,U_m(\sin\omega t)=I_{скm}\sin\omega t. \qquad (4.12б)$$

Активная составляющая полного тока $i_a(t)$ равна сумме (4.12а) и (4.12б):

$$i_a(t)=(I_{скm}+I_{cam})\sin\omega t. \qquad (4.13)$$

В этом уравнении

$$I_{скm}=U_mS/(\rho_v d)=U_m/R_0;$$

$$I_{cam}=U_mS\varepsilon_0(\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty})\omega^2\tau/[1+(\omega\tau)^2]\,d,$$

где $R_0=\rho_v d/S$ — сопротивление изоляции.

Введя зависящую от ω диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{r\omega}$, формулу (4.11) можно записать в виде

$$i_{cr}(t)=(\varepsilon_0\varepsilon_{r\omega}S/d)\,\omega U_m\cos\omega t. \qquad (4.14)$$

Из (4.11) и (4.14) находим

$$\varepsilon_{r\omega}=\varepsilon_{r\infty}+(\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty})/[1+(\omega\tau)^2]. \qquad (4.15)$$

Из (4.15) следует, что диэлектрическая проницаемость полярного диэлектрика плавно уменьшается с увеличением частоты от ε_c при $\omega=0$ до $\varepsilon_{r\infty}$ при $\omega=\infty$ (рис. 4.2, *а*). При наличии нескольких релаксаторов наблюдаются локальные минимумы при частотах, близких к $\omega_i=1/\tau_i$. Из (4.11) и (4.13) находится $\operatorname{tg}\delta$ полярного диэлектрика в функции ω:

$$\operatorname{tg}\delta=\frac{1+(\omega\tau)^2+(\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty})\omega^2\tau\varepsilon_0\rho_v}{\omega\rho_v\varepsilon_0\varepsilon_{r\infty}[(\omega\tau)^2+1]+\omega\rho_v\varepsilon_0(\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty})}. \quad (4.16)$$

При увеличении частоты $\operatorname{tg}\delta$ сначала падает от значения $\operatorname{tg}\delta(\infty)$ при $\omega=0$, затем возрастает, достигая максимума при частоте ω_m, определяемой из условия $d\operatorname{tg}\delta/d\omega=0$, после чего убывает до $\operatorname{tg}\delta=0$ при $\omega=\infty$ (рис. 4.2, *б*). Дифференцируя (4.16) по ω и приравнивая производную нулю, находим

$$\omega_m=\sqrt{\varepsilon_{rc}/\varepsilon_{r\infty}}/\tau. \quad (4.17)$$

Подставляя (4.17) в (4.16), получаем

$$\operatorname{tg}\delta_m=(\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty})/2\sqrt{\varepsilon_{rc}\varepsilon_{r\infty}}. \quad (4.18)$$

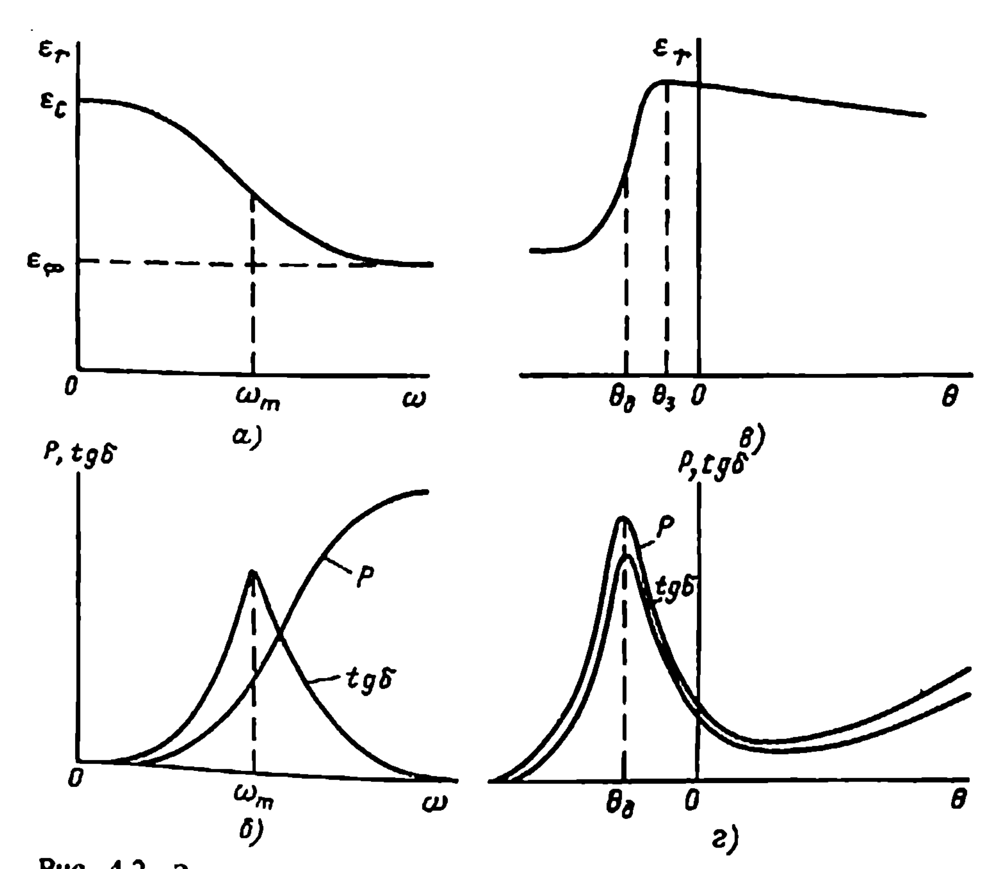


Рис. 4.2. Зависимости ε_r, P и $\operatorname{tg}\delta$ от частоты и температуры: *а, б* — при $\omega=\text{var}$, $\Theta=\text{const}$; $\rho_v=\infty$; $R_0=\infty$; *в, г* — при $\omega=\text{const}$, $\Theta=\text{var}$

Потери мощности в диэлектрике с одним релаксатором определяются только значением $i_а$:

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T i_а(t)u(t)dt=I_{схm}U_m/2+I_{саm}U_m/2=$$
$$=\frac{U^2}{R_0}+\varepsilon_0\frac{\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty}}{d}S\frac{\omega^2\tau}{1+(\omega\tau)^2}U^2, \qquad (4.19)$$

где T — период изменения кривой напряжения.

Первое слагаемое выражает потери, обусловленные сквозной проводимостью, второе — релаксационной поляризацией. Релаксационные потери пропорциональны функции

$$f(\omega)=\omega^2\tau/[1+(\omega\tau)^2]. \qquad (4.20)$$

При $\omega=0$ $f(\omega)=0$; с ростом ω она возрастает, асимптотически приближаясь к значению $1/\tau$ при $\omega=\infty$. Скорость изменения $f(\omega)$ вначале, при малых значениях ω, увеличивается, достигая максимума при $\omega\approx 1/\tau$. При дальнейшем повышении ω она снижается и равна нулю при $\omega=\infty$. При наличии нескольких релаксаторов подсчет производится отдельно для каждого релаксатора и общие потери находятся как сумма потерь отдельных релаксаторов (подробнее об этом см. в § 13.3).

При изменении температуры полярного диэлектрика изменяются не только его линейные размеры и объем, изменяя число молекул n в единице объема, но также и условия дипольной поляризации, затрудняя ее при уменьшении и облегчая при повышении температуры за счет изменения подвижности молекул жидкости и отдельных звеньев молекул в полярных полимерах, а также изменяется кинетическая энергия теплового движения молекул. Экспериментальные зависимости ε_r от температуры полярных жидкостей представляют сложные кривые, имеющие максимум (рис. 4.2, *в*). Снижение ε_r при повышении температуры происходит как за счет уменьшения n, так и за счет нарушения ориентации полярных молекул (их разориентации) вследствие большой кинетической энергии их теплового движения. С понижением температуры n возрастает, а кинетическая энергия теплового движения молекул снижается, в результате чего уменьшается нарушение ориентации диполей и ε_r растет. Она увеличивается до максимума при некоторой температуре по закону, близкому к линейному, и после прохождения максимума резко снижается. Такое поведение объясняется тем, что при температурах ниже температуры максимума ε_r силы взаимного притяжения диполей вследствие уменьшения расстояния между ними становятся соизмеримыми и большими, чем силы, обусловливающие

движение, и начинается процесс постепенного взаимного связывания дипольных молекул жидкости друг с другом и переходом жидкости в твердое аморфное состояние с одновременной взаимной компенсацией их собственных дипольных моментов, что имеет следствием снижение ε_r. Температура $\Theta_з$, соответствующая максимуму ε_r, является температурой начала застывания жидкости. Температурой окончания застывания жидкости является температура, при которой прекращается снижение ε_r. Все молекулы при ней являются взаимосвязанными и образуют твердое аморфное тело. Собственные дипольные моменты молекул в этом состоянии практически полностью взаимно скомпенсированы, и имеет место практически только деформационная поляризация электронного смещения, чем и объясняется малое значение ε_r. Температура $\Theta_з$ является одной из характерных температур полярной жидкости. Аналогичные явления наблюдаются и в твердых полярных полимерах. С повышением температуры до $\Theta_з$ увеличивается подвижность молекул, что обусловливает рост ε_r в определенном температурном диапазоне. При дальнейшем повышении температуры кинетическая энергия теплового движения становится настолько большой, что нарушается ориентация диполей и ε_r начинает снижаться (рис. 4.2, *в*).

При $\omega=2\pi f=\mathrm{const}$ в зависимости от $\mathrm{tg}\,\delta$ от Θ в полярных диэлектриках при определенной температуре $\Theta_д$ имеет место дипольный максимум $\mathrm{tg}\,\delta$, соответствующий условию $\omega\approx 1/\tau(\Theta)$, где $\tau(\Theta)$ — постоянная времени установления поляризации. С ростом температуры $\tau(\Theta)$ уменьшается, что и приводит в соответствии с (4.20) к возникновению дипольного максимума в зависимости P и $\mathrm{tg}\,\delta$ от температуры (рис. 4.2, *г*). Если в диэлектрике поляризация определяется несколькими механизмами с различными τ_j, то в зависимости $\mathrm{tg}\,\delta$ от Θ будет иметь место ряд максимумов, каждый из которых будет соответствовать условию $\omega_j\approx 1/\tau_j(\Theta)$. В области повышенных температур рост P и $\mathrm{tg}\,\delta$ определяется увеличением объемной проводимости γ с ростом температуры [см. (4.7) и (4.8б)]. Изменение $\mathrm{tg}\,\delta$ полярной жидкости при изменении температуры изложено в гл. 6. Отметим только, что при наличии в диэлектрике нескольких материалов, каждый из которых имеет свою температуру $\Theta_д$ дипольного максимума $\mathrm{tg}\,\delta$, отличную от температуры дипольного максимума других материалов, в температурной зависимости $\mathrm{tg}\,\delta$ такого диэлектрика будет наблюдаться столько максимумов, сколько полярных материалов он содержит. Амплитудное значение максимума каждого материала в составном диэлектрике будет меньше амплитудного значения, соответствующего каждому материалу в отдельности. При совпадении температур $\Theta_д$ нескольких материалов амплитудное значение максимума

$\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика возрастает по сравнению с амплитудным значением максимума одного материала. В бумажном диэлектрике силового конденсатора, пропитанном полярной жидкостью, температура дипольного максимума $\operatorname{tg}\delta_k$ клетчатки много ниже нижней границы рабочего диапазона температур конденсаторов, и характер температурной зависимости его в рабочем диапазоне температур будет определяться температурной зависимостью $\operatorname{tg}\delta_ж$ пропитывающей жидкости.

4.3. СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИКА С ПОТЕРЯМИ

При расчетах электрических характеристик изоляционных материалов пользуются эквивалентными схемами или схемами замещения. Диэлектрик с потерями, образующий конденсатор, может быть представлен конденсатором без потерь и некоторым активным сопротивлением, включаемым параллельно или последовательно с конденсатором без потерь. В первом случае будем иметь параллельную схему замещения, во втором — последовательную схему, показанные на рис. 4.3, *а* и *б*. Там же приведены и их векторные диаграммы. Сопротивление выбирается таким, чтобы джоулевы потери в нем были равны действительным потерям в диэлектрике. Потери мощности в конденсаторе на переменном напряжении составляют

$$P = UI\cos\varphi,$$

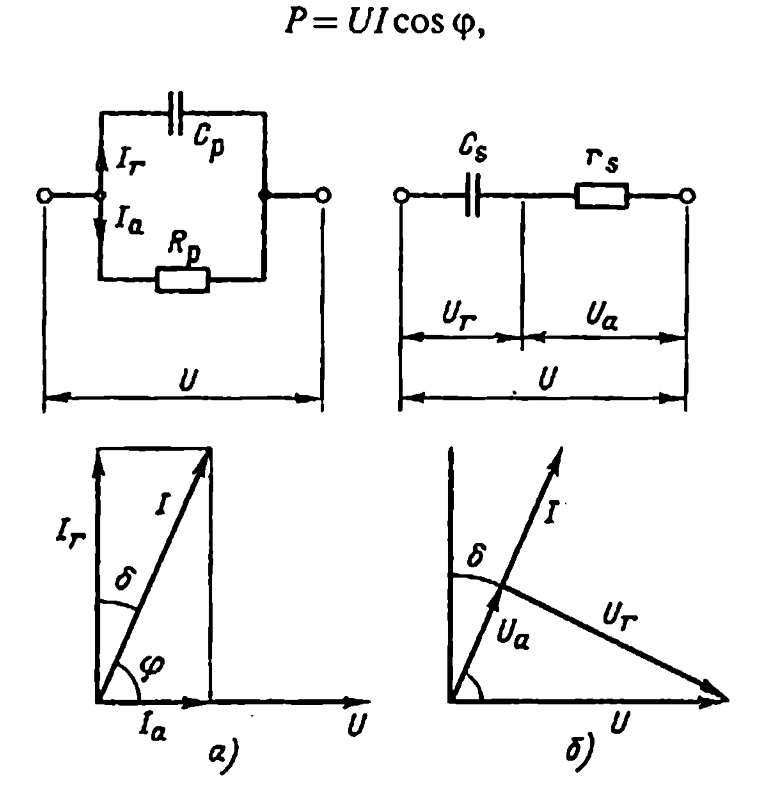


Рис. 4.3. Схемы замещения конденсатора с потерями

где U и I — действующие значения напряжения и тока; φ — угол сдвига между ними.

Использовав векторные диаграммы рис. 4.3, можно записать

$$P = UI\cos\varphi = UI_a = UI_r\,\mathrm{tg}\,\delta.$$

Из рис. 4.3 следует

$$\mathrm{tg}\,\delta = I_a/I_r = U_a/U_r = P/Q, \qquad (4.21а)$$

где $Q = UI_r$ — реактивная мощность конденсатора. Из (4.21а) находим для последовательной схемы

$$\mathrm{tg}\,\delta_s = \frac{U_a}{U_r} = \frac{Ir_s}{I/\omega C_s} = \omega r_s C_s \qquad (4.21б)$$

и для параллельной

$$\mathrm{tg}\,\delta_p = \frac{I_a}{I_r} = \frac{U/R_p}{U\omega C_p} = \frac{1}{\omega R_p C_p}. \qquad (4.21в)$$

Если параллельная и последовательная схемы соответствуют одному и тому же конденсатору, то их полные сопротивления

$$Z_s = Z_p = r_s - i\,\frac{1}{\omega C_s} = \frac{1}{(1/R_p) + i\omega C_p}. \qquad (4.22)$$

Приравнивая действительные и мнимые части и используя формулы (4.21), находим соотношения между параметрами параллельной (с индексом p) и последовательной (с индексом s) схем:

$$\left.\begin{aligned} R_p &= r_s(1 + 1/\mathrm{tg}^2\delta); \\ C_p &= C_s/(1 + \mathrm{tg}^2\delta). \end{aligned}\right\} \qquad (4.23)$$

Обе эквивалентные схемы имеют формальное значение и не могут быть использованы для расчета частотной зависимости $\mathrm{tg}\,\delta$ диэлектрика с помощью формул (4.21) по значениям параметров r_s, C_s, R_p, C_p, определенных при некоторых частоте и температуре, поскольку и диэлектрическая проницаемость, и $\mathrm{tg}\,\delta$ диэлектрика зависят от частоты и температуры. Следовательно, параметры схем замещения также являются функциями частоты и температуры. При заданных и неизменных значениях частоты и температуры может быть использована любая из схем замещения, и по известным при заданных условиях параметрам схемы замещения по формулам (4.21) можно рассчитать правильное значение $\mathrm{tg}\,\delta$ диэлектрика.

Глава пятая

ТВЕРДЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ КОНДЕНСАТОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

5.1. СОСТАВ И СТРУКТУРА КОНДЕНСАТОРНОЙ БУМАГИ

Бумага в электрической изоляции вообще и в конденсаторостроении, в частности, играет важную роль, несмотря на внедрение синтетических полимерных материалов. Ее значение как изоляционного материала сохранится и в будущем. Основу бумаги (85—95%) составляет природный полярный полимер — α-целлюлоза или клетчатка, получаемая в настоящее время сульфатным способом из древесины. Помимо α-целлюлозы древесная клетчатка содержит гемицеллюлозы (гексозаны, пентозаны, уроновые кислоты) и лигнин, значительно влияющие на $\operatorname{tg}\delta$ и другие характеристики бумаги. В процессе обработки бумажной массы часть волокон раздавливается, образуя так называемую «слизь», ухудшающую характеристики бумаги. Весь этот комплекс образует бумажное волокно.

Макромолекулы целлюлозы составляются из большого количества глюкозных колец, соединенных кислородными мостиками (рис. 5.1). Число n глюкозных колец в макромолекуле характеризует степень полимеризации и для конденсаторной

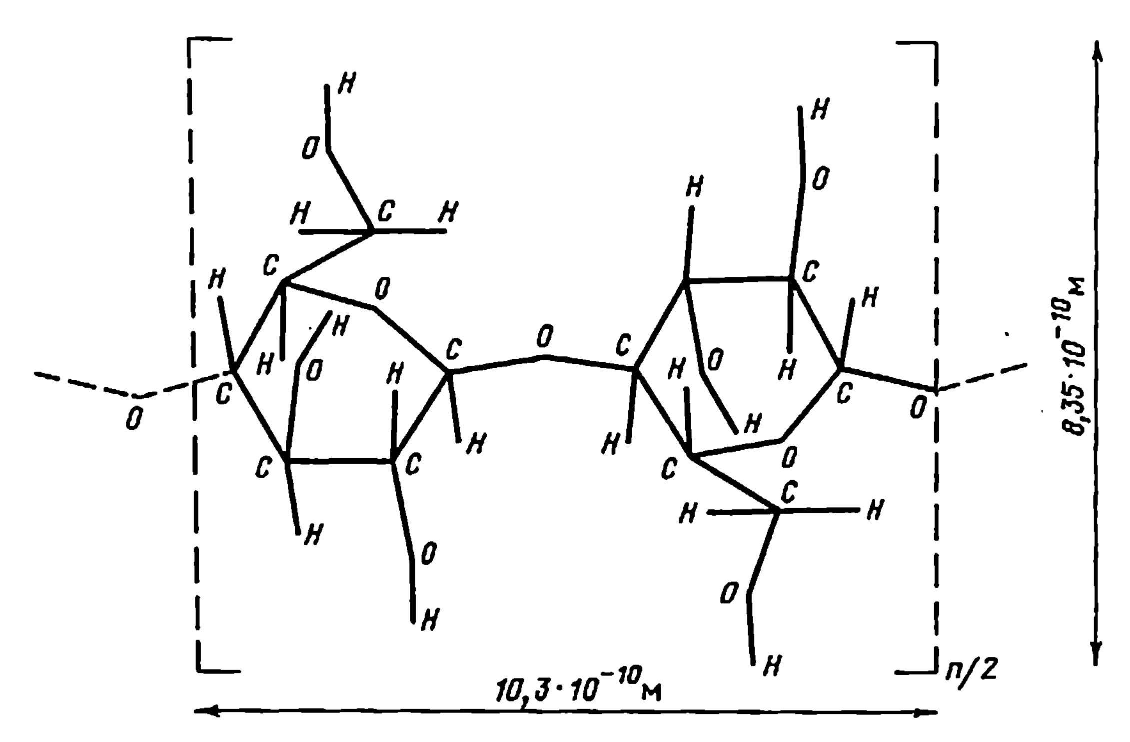


Рис. 5.1. Структура молекулы α-целлюлозы

бумаги равно 1000—2000. Расстояния между ядрами атомов, входящих в состав глюкозного кольца, нм, составляют С—С—0,154, С—Н—0,107, С—О—0,143, О—Н—0,096. Энергии химических связей, килокал/моль, равны: С—С—58,6, С—Н—87,3, С—О—70, О—Н—110,2.

Молекулярная рефракция группы ОН, связанной с расположенным в кольце атомом углерода, равна 1,52, и поляризуемость $\alpha=1{,}52\cdot10^{-18}$ м^3 или $\alpha=1{,}692\cdot10^{-24}$ Ф·м^2, а собственный дипольный момент $\mu=5{,}33\cdot10^{-30}$ Кл·м. По межъядерным расстояниям определяются размеры глюкозного кольца, показанные на рис. 5.1, и по ним — длина полимерной цепи или макромолекулы, равная произведению длины элементарной молекулы на *n* и составляющая 550—1300 нм. Как показывает опыт, фактическая длина макромолекулы меньше ее теоретической. Это означает, что макромолекула не представляет собой вытянутую жесткую палочку, а является гибкой нитью, которая может складываться, в результате чего ее длина уменьшается. Такие укороченные молекулы образуют пучки длиной 15—20 и диаметром 2—5 нм, называемые мицеллами, представляющими надмолекулярную структуру целлюлозы. Зазоры между макромолекулами в мицелле составляют около 1,0 нм, т. е. целлюлоза имеет большой стерический фактор, характеризующий плотность упаковки. Длина мицеллы составляет около 10^{-4} мм (10^2 нм), и диаметр — около 100 нм. На рис. 5.2 [1.9] показано образование мицелл. На некоторых участках макромолекулы располагаются параллельно друг другу, образуя структуру, называемую кристаллической. В природной целлюлозе кристаллическая часть составляет около 70%. Вследствие неодинаковости длин макромолекул на концах мицелл образуется «бахрома», с помощью которой они сцепляются друг с другом. Внутримицеллярные полости имеют диаметр до 3,0 нм.

Из мицелл образуются фибриллы, уже различаемые в микроскоп. Зазоры между образующими фибриллу мицеллами составляют около 10,0 нм. Из фибрилл образуется целлюлозное волокно, имеющее форму трубки. Фибриллы в волокне располагаются вдоль его оси параллельно друг другу. Длина волокна может быть от нескольких миллиметров до нескольких десятков миллиметров, его диаметр 0,02—0,07 мм, и толщина стенок 0,002—0,008 мм. Строение целлюлозы обусловливает значительную пористость бумаги: субмикроскопическую — зазоры между макромолекулами и мицеллами; микроскопическую — внутренние каналы в фибриллах и волокне и зазоры между фибриллами, имеющие размер порядка 100 нм; макроскопическую — зазоры между волокнами, размеры которых зависят от плотности бумаги. Группы ОН, обусловливающие полярность целлюлозы, имеют очень большое значение для

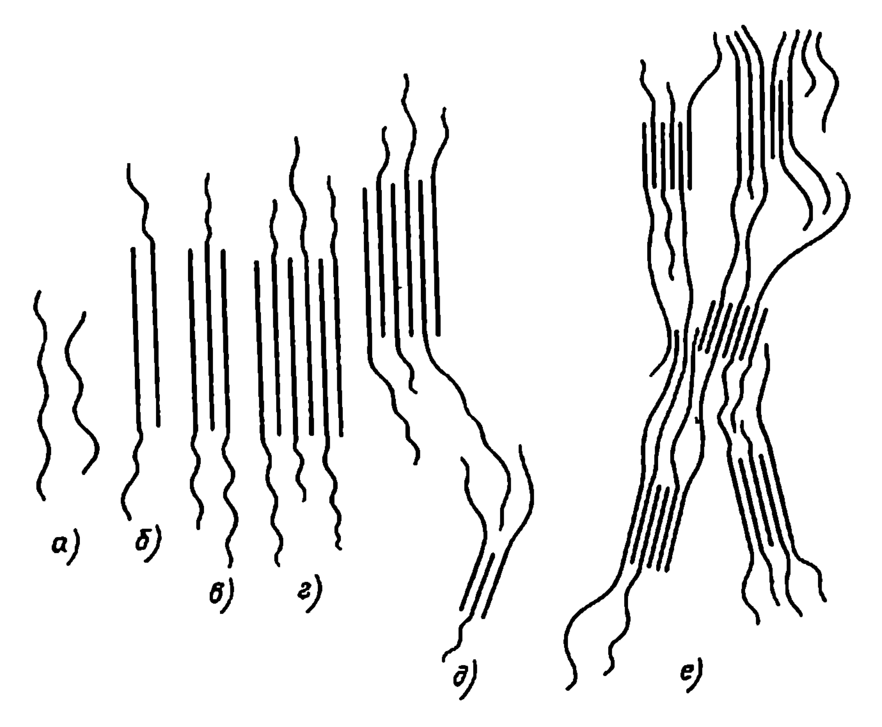


Рис. 5.2. Надмолекулярная структура целлюлозы:
а — д - возникновение мицеллярной сетки из макромолекул; *е* — мицеллярная система

образования поперечных связей между макромолекулами. Силы, образующие поперечные связи, являются электростатическими и ван-дер-ваальсовыми силами. Кроме того, возникают водородные связи.

Значения электрофизических параметров клетчатки, измеренных при частоте 50 Гц и температуре 20° С, составляют: относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{r\text{к}}=5\div7$; плотность $\gamma_\text{к}=(1{,}5\div1{,}55)\cdot10^3$ кг/м^3, $\operatorname{tg}\delta_\text{к}=(6-7)\cdot10^{-3}$.

Опыт проектирования конденсаторов показал, что хорошее совпадение расчетных и опытных данных по емкости получается при

$$\varepsilon_{r\text{к}}=6{,}5 \text{ и } \gamma_\text{к}=1{,}55\cdot10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетные и опытные значения $\operatorname{tg}\delta$ бумаги имеют значительное расхождение в связи с тем, что на него оказывает влияние не только $\operatorname{tg}\delta_\text{к}$, но и целый ряд других факторов. В области температур Θ минус 80—90° С при $f=50$ Гц $\operatorname{tg}\delta_\text{к}$ имеет максимум, значение которого примерно на порядок выше его значения при $\Theta=20°$ С. С увеличением частоты максимум смещается в сторону повышения температуры. С понижением температуры $\varepsilon_\text{к}$ уменьшается, и в области температур $\Theta=-80\div+100°$ С при $f=50$ Гц ее изменение близко к линейной зависимости и хорошо описывается эмпирической формулой

$$\varepsilon_{r\text{к}}=\varepsilon_{r\text{к}0}\left[1+a_\text{к}(\Theta-20)\right], \qquad (5.1)$$

где $\varepsilon_{r\kappa 0}$ — диэлектрическая проницаемость клетчатки при $\Theta=20^\circ$ С; a_κ — опытная постоянная. Для температур от -60 до $+120^\circ$ С $a_\kappa=5\cdot10^{-4}$ 1/°С. Следует отметить, что на свойства целлюлозы, определяющие характеристики и качество конденсаторной бумаги, являющейся растительным продуктом, влияют условия произрастания исходного сырья для ее получения — древесины. Кроме того, значительное влияние — и главным образом на $\operatorname{tg}\delta$ — оказывает также качество технологической воды при ее изготовлении.

5.2. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БУМАЖНОГО ЛИСТА

Волокна клетчатки и поры в бумажном листе образуют последовательную цепочку, и для расчета эквивалентных значений ε_r и $\operatorname{tg}\delta$ такой системы может быть использована последовательная схема замещения листа, представленная на рис. 5.3, исходя из которой В. Т. Ренне с использованием формулы (4.21а) были предложены соответствующие расчетные формулы. Обозначим плотность клетчатки через γ_κ и плотность сухой бумаги γ. При толщине листа d_1 эквивалентная толщина слоя клетчатки в нем равна $d_\kappa=d_1\gamma/\gamma_\kappa$ и пор $d_ж=d_1-d_\kappa=(1-\gamma/\gamma_\kappa)d_1$. Зная толщины слоев компонентов бумажного листа, выразим включенные последовательно частичные емкости C_κ и $C_ж$, образуемые соответственно клетчаткой и порами, через параметры эквивалентной схемы. Подставляя их затем в формулу, выражающую емкость двух последовательно соединенных конденсаторов, находим эквивалентную диэлектрическую проницаемость ε_r бумажного листа:

$$\varepsilon_r=\frac{\varepsilon_{rж}}{1-\gamma/\gamma_\kappa(1-\varepsilon_{rж}/\varepsilon_{r\kappa})}, \qquad (5.2а)$$

где $\varepsilon_{rж}$ — диэлектрическая проницаемость вещества пор. Для газов $\varepsilon_{rж}\approx1$, для жидких и твердых вещества $\varepsilon_{rж}>1$.

Для пропитки силовых конденсаторов применяются электроизоляционные жидкости. Жидкая пропитка имеет ряд преимуществ перед другими: диэлектрическая проницаемость и электрическая прочность жидкости больше, чем у газов; жидкость легко проникает в поры и не дает усадки; остаточные газы растворяются в жидкости до молекулярного состояния; продукты старения могут диффундировать из очага старения, что снижает их концентрацию, и др. Формула (5.2а) позволяет рассчитать диэлектрическую проницаемость непропитанного и пропитанного бумажного листа, определяемую его физическими характеристиками и $\varepsilon_{rж}$. Заменой $\varepsilon_{rж}/\varepsilon_{r\kappa}=\beta$ формула (5.2а) приводится к виду

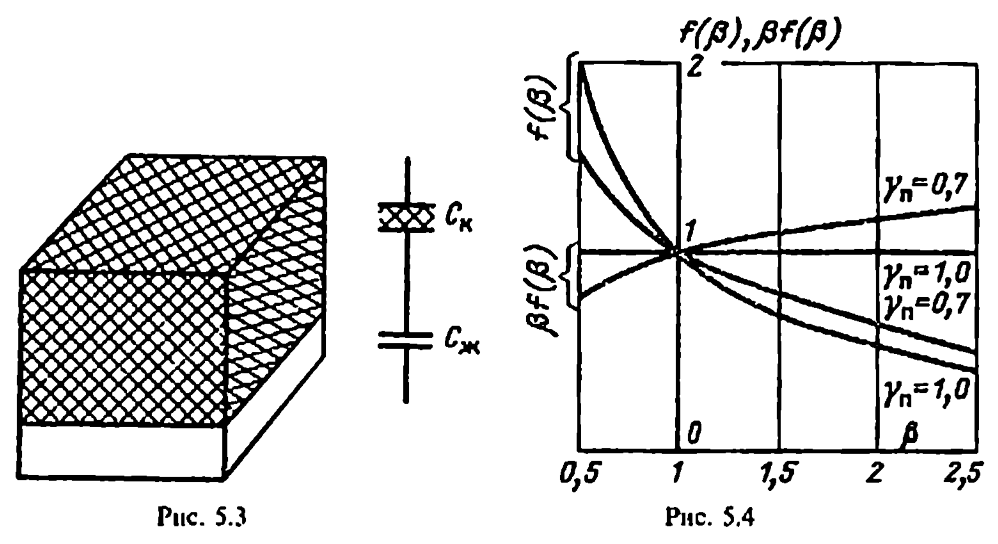


Рис. 5.3 Рис. 5.4

Рис. 5.3. Последовательная эквивалентная схема бумажного листа

Рис. 5.4. Графики функций $f(\beta)$ и $\beta f(\beta)$ ($\gamma_п$ — приведенная плотность)

$$\varepsilon_r = \frac{\beta}{1-\frac{\gamma}{\gamma_к}(1-\beta)}\varepsilon_{rк}, \qquad (5.2б)$$

где ε_r зависит от функции

$$\beta f(\beta) = \beta/[1-(\gamma/\gamma_к)(1-\beta)].$$

Графики функции $\beta f(\beta)$ представлены на рис. 5.4. При $\beta\to\infty$ (или $\varepsilon_{rж}\to\infty$)

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rк}/(\gamma/\gamma_к), \qquad (5.3)$$

т. е. имеет конечное значение, определяемое плотностью бумаги.

Формула для вычисления эквивалентного значения $\operatorname{tg}\delta$ бумажного листа также может быть получена из эквивалентной схемы рис. 5.3, в которой каждый частичный конденсатор с потерями $C_к$ и $C_ж$ заменяется конденсатором без потерь и включаемым последовательно с ним сопротивлением потерь $r_{sк}$ и $r_{sж}$ в соответствии с изложенным в § 4.3. В этом случае из (4.21а) для сопротивлений потерь находим

$$r_{sк} = \operatorname{tg}\delta_к/(\omega C_{sк});$$
$$r_{sж} = \operatorname{tg}\delta_ж/(\omega C_{sж}) \qquad (5.4)$$

Очевидно, эквивалентное сопротивление потерь r_s листа в целом равно сумме $r_{sк}$ и $r_{sж}$:

$$r_s = \frac{\operatorname{tg}\delta}{\omega C} = \frac{\operatorname{tg}\delta_к C_ж + \operatorname{tg}\delta_ж C_к}{\omega C_к C_ж},$$

где $C=C_к C_ж/(C_к+C_ж)$ — эквивалентная емкость по схеме замещения рис. 5.3.

Из полученной формулы имеем

$$\operatorname{tg}\delta=\operatorname{tg}\delta_к\frac{C_ж}{C_ж+C_к}+\operatorname{tg}\delta_ж\frac{C_к}{C_ж+C_к}.$$

Выражая в этой формуле частичные емкости через параметры схемы замещения рис. 5.3, получаем

$$\operatorname{tg}\delta=\frac{\beta\frac{\gamma}{\gamma_к}\operatorname{tg}\delta_к+\left(1-\frac{\gamma}{\gamma_к}\right)\operatorname{tg}\delta_ж}{1-\frac{\gamma}{\gamma_к}(1-\beta)}, \tag{5.5}$$

где $\operatorname{tg}\delta_ж$ — тангенс угла потерь вещества пор (жидкости).

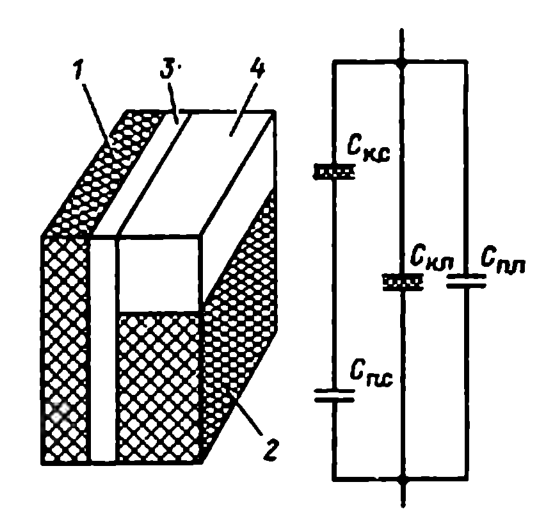
Графики функции $f(\beta)=1/[1-(\gamma/\gamma_к)(1-\beta)]$ приведены на рис. 5.4. Для сухой непропитанной бумаги $\beta=1/\varepsilon_{rк}\approx0{,}154$ и $\operatorname{tg}\delta_ж\approx0$, и тогда

$$\operatorname{tg}\delta=\frac{\gamma/\gamma_к}{1-0{,}846\gamma/\gamma_к}\cdot\frac{\operatorname{tg}\delta_к}{\varepsilon_{rк}}.$$

Формулы (5.2а) и (5.2б) довольно точно отражают не только качественные, но и количественные соотношения в одиночном бумажном листе и широко используются в практических расчетах. Вопрос о сходимости расчетных и опытных значений для $\operatorname{tg}\delta$ является значительно более сложным, чем для ε_r. При расчете ε_r требовалось практически достижение только максимально возможной точности определения количеств компонентов (или их долей) в бумаге и их физических характеристик. При расчете $\operatorname{tg}\delta$ помимо тех же факторов значительную роль играют не поддающиеся точному количественному описанию факторы физико-химического характера — остающиеся после термовакуумной обработки влага и воздух, а также ионные примеси в пропиточном диэлектрике. С ростом остаточной влаги $\operatorname{tg}\delta$ увеличивается, и его зависимость от температуры принимает U-образный характер. Наличие остаточного воздуха приводит к повышению $\operatorname{tg}\delta$ при напряжениях возникновения частичных разрядов (ЧР) и выше. Для сухого бумажного листа $\operatorname{tg}\delta$ не является такой стабильной характеристикой, как ε_r, и может зависеть от многих случайных и в том числе технологических факторов, например от качества подготовки воды при изготовлении бумаги.

Для бумаг пониженных плотностей и малых толщин вероятность появления сквозных пор через всю толщу листа велика, и простая последовательная схема в этом случае становится непригодной. Для расчета электрических характеристик таких систем предложена комбинированная после-

Рис. 5.5. Комбинированная эквивалентная схема бумажного листа:
1 — параллельная ($C_{к.п}$) и 2 — последовательная ($C_{к.с}$) части клетчатки; 3 — параллельная ($C_{ж.п}$) и 4 — последовательная ($C_{пс}$) части пор



довательно-параллельная схема замещения (рис.5.5). Диэлектрическая проницаемость бумажного листа

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{rк} k V_{к.п} + \varepsilon_{rж} V_{ж.п} + \varepsilon_{rк}\varepsilon_{rж}\frac{(V_{к.с}+V_{ж.с})^2}{\varepsilon_{rк}V_{ж.с}+\varepsilon_{rж}V_{к.с}}, \quad (5.6)$$

где $V_{к.п}$ — относительный объем клетчатки; $V_{ж.п}$ — то же для пор, включенных параллельно; $V_{к.с}$ — относительный объем клетчатки и $V_{ж.с}$ — то же для пор, включенных последовательно.

Относительные объемы клетчатки и пор связаны соотношениями

$$V_{к.п} + V_{ж.п} + V_{к.с} + V_{ж.с} = 1; \quad (5.7)$$

$$V_{к.п} + V_{к.с} = \gamma/\gamma_к. \quad (5.8)$$

Эквивалентное значение $\operatorname{tg}\delta$ для этой схемы

$$\operatorname{tg}\delta = [(A + K_\delta B)/(A+B)]\operatorname{tg}\delta_к, \quad (5.9)$$

где

$$A = \frac{V_{к.п}}{\beta}(\beta V_{к.с} + V_{ж.с})^2 + \beta V_{ж.с}(V_{к.с} + V_{ж.с})^2; \quad (5.10)$$

$$B = V_{ж.п}(\beta V_{к.с} + V_{ж.с}) + V_{ж.с}(V_{к.с} + V_{ж.с})^2; \quad (5.11)$$

$$K_\delta = \operatorname{tg}\delta_ж/\operatorname{tg}\delta_к.$$

Параллельную часть объема клетчатки можно представить так:

$$V_{к.п} = n V_{к.с},$$

где $0 \leqslant n \leqslant 0{,}333$, и в среднем $n = 0{,}143$.

Расчет по (5.6) для бумаг с $\gamma \leqslant 8 \cdot 10^3$ кг/м^3 дает лучшее совпадение с опытными данными, чем по формуле последовательной схемы; применение этой формулы при больших плотностях бумаг не дает преимуществ.

Численное значение и температурная зависимость $\operatorname{tg}\delta$ непропитанной бумаги определяются в первую очередь и главным образом $\operatorname{tg}\delta$ бумаги, который, в свою очередь, определяется $\operatorname{tg}\delta$ клетчатки $\operatorname{tg}\delta_к$. Проведенные в США исследования влияния на $\operatorname{tg}\delta_к$ составных частей клетчатки показали, что

наименьшее значение $\operatorname{tg}\delta_к$ будет иметь место при некоторой определенной доле гемицеллюлоз и, главным образом, пентозанов в ней. Отклонение от этого значения в ту или другую сторону приводит к повышению $\operatorname{tg}\delta_к$. Полное удаление лигнина снижает нагревостойкость бумаги. Таким образом, возможности улучшения $\operatorname{tg}\delta$ бумаги за счет изменения соотношений между ее компонентами исчерпаны, и попытки дальнейшего снижения $\operatorname{tg}\delta_к$ не дали ощутимых результатов. Наличие неорганических примесей (главным образом, ионов одновалентных металлов) в бумаге резко повышает $\operatorname{tg}\delta$ и ухудшает температурную характеристику. Поэтому для получения качественной конденсаторной бумаги необходимо применять максимально чистый материал с оптимальным содержанием компонентов.

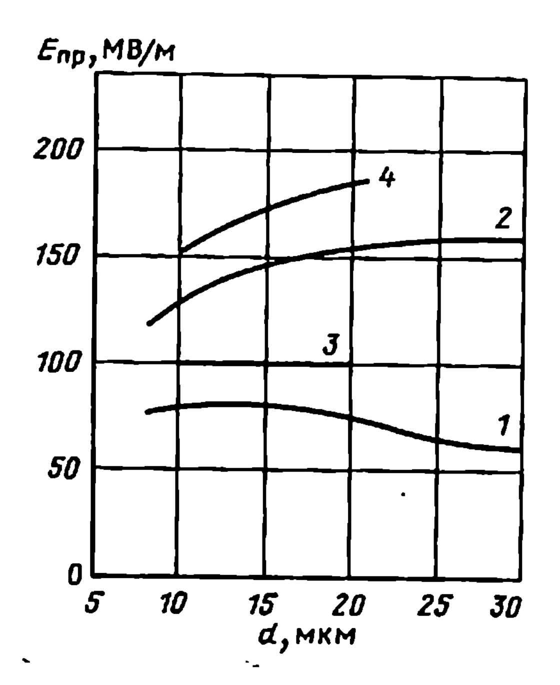
5.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И ТОКОПРОВОДЯЩИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В БУМАЖНОМ ЛИСТЕ

Кратковременная электрическая прочность является одной из важных технических характеристик бумажного листа. Под кратковременной электрической прочностью $E_{пр}$ понимается напряженность поля, получающаяся как отношение постепенно повышаемого с некоторой скоростью до наступления пробоя напряжения (постоянного или переменного) $U_{пр}$ к толщине листа d_1:

$$E_{пр}=U_{пр}/d_1.$$

Из-за неоднородности структуры бумажного листа эта величина имеет стохастическую природу и оценивается статистическими методами. С помощью специальных технологических мероприятий неоднородность структуры листа может быть уменьшена и его электрическая прочность повышена. Приводимые в справочной литературе значения электрической прочности представляют собой наиболее вероятное значение или математическое ожидание.

Электрическая прочность пропитанного и непропитанного бумажного листа определяется на малых макетах конденсаторов, диэлектрик которых содержит не менее двух листов исследуемой бумаги. Полученный результат пересчитывается на один лист. Таким образом, электрическая прочность одиночного листа представляет некоторую условную величину, с помощью которой, однако, может быть произведено сопоставление различных бумаг. Кратковременная электрическая прочность одной и той же бумаги на переменном и постоянном напряжении различна, но характер зависимостей сохраняется



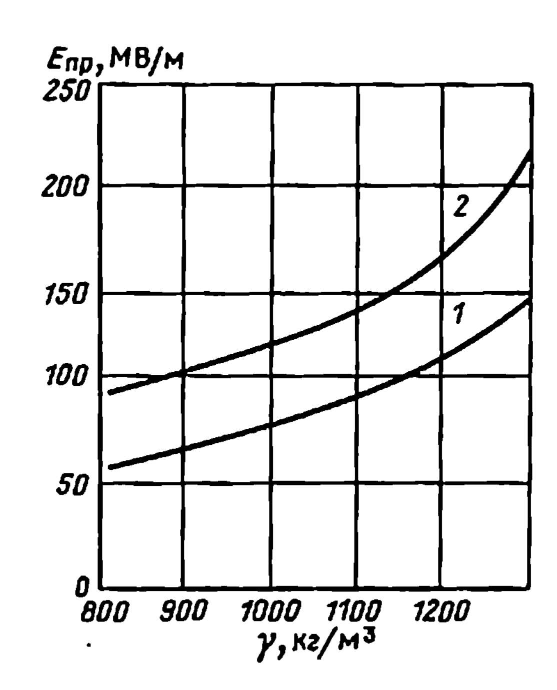


Рис. 5.6. Зависимость кратковременной электрической прочности различных бумаг от толщины листа бумаги:

1, *3* — сухая бумага; *2*, *4* — бумага, пропитанная трихлордифенилом (*1*, *2* — нормальные бумаги; *3*, *4* — бумаги повышенной прочности)

Рис. 5.7. Зависимость кратковременной электрической прочности от плотности бумаги:

1 — сухая бумага; *2* — бумага, пропитанная трихлордифенилом

в обоих случаях. На рис. 5.6 приведены типичные экспериментальные зависимости $E_{пр}$ пропитанного и непропитанного бумажного листа от его толщины, на рис. 5.7 — от плотности. Увеличение электрической прочности бумаг с повышенной прочностью составляет 25—30% по отношению к электрической прочности нормальных бумаг.

Предпринимались попытки найти связь между электрической прочностью бумажного листа и его электрофизическими характеристиками теоретическим путем. Исходя из последовательной эквивалентной схемы и последовательности пробоя, состоящей в том, что на переменном напряжении пробой бумажного листа происходит в две стадии — сначала пробивается вещество поры как более слабый компонент, а затем клетчатка, В. Т. Ренне предложена следующая формула для расчета электрической прочности на переменном напряжении:

$$E_{пр}=\frac{U_{пр.ж}}{d_1}\left(1+\beta\frac{\gamma/\gamma_к}{1-\gamma/\gamma_к}\right), \tag{5.12}$$

где $U_{пр.ж}$ — действующее значение напряжения пробоя вещества пор, имеющего толщину в несколько микрометров.

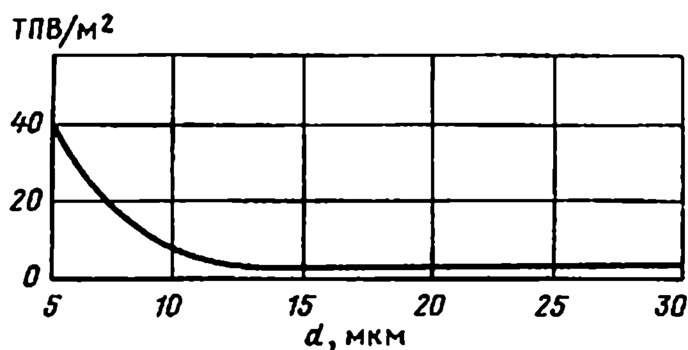


Рис. 5.8. Зависимость количества ТПВ/м² от толщины листа

Для воздуха с $d_в = 7 \div 8$ мкм; $U_{пр.в} = 250$ В. Однако эта формула дает только качественные соотношения, и расчет по ней расходится с опытными данными.

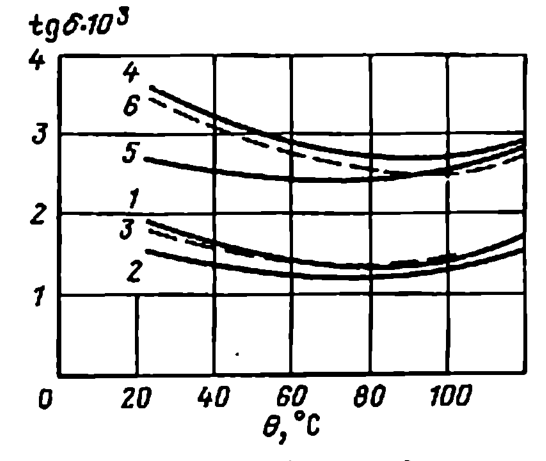
Существенное влияние на электрическую прочность оказывают токопроводящие включения (ТПВ), представляющие собой частицы металлов или их оксиды, попадающие в бумагу в процессе ее изготовления. В месте нахождения ТПВ фактическая (изолирующая) толщина (при сохранении общей толщины) листа уменьшается, и снижается его электрическое сопротивление. При совпадении расположения токоведущих включений в отдельных листах многослойного диэлектрика электрическая прочность его в этом месте может быть значительно снижена. Поэтому в соответствующих нормативно-технических документах нормируется количество ТПВ на 1 м^2 бумажного листа.

На рис. 5.8 приведена зависимость количества ТПВ на 1 м^2 бумажного листа от толщины листа. Однако следует иметь в виду, что определение ТПВ основано на измерении сопротивления и чувствительность прибора будет играть важную роль. По ГОСТ 1908-82 аппараты для определения ТПВ должны регистрировать ТПВ с сопротивлением от $2 \cdot 10^5$ Ом и ниже. Аппараты, применяемые некоторыми зарубежными фирмами, регистрируют ТПВ с сопротивлением от 10^6 Ом и ниже. Поэтому снижение кривой на рис. 5.8 может и не означать действительного снижения числа ТПВ, так как ТПВ одной и той же толщины в листах толщиной 10 и 30 мкм имеют различные сопротивления. Снижения числа ТПВ можно добиться применением более качественной целлюлозы и улучшением технологического процесса выработки бумаги. При влажности бумаги 6—8% сопротивление большинства ТПВ составляет 10^4—10^5 Ом, и лишь незначительная часть имеет сопротивление ниже 10^4 и выше 10^5 Ом. После сушки и пропитки сопротивление большинства ТПВ возрастает на порядок. Снижение электрической прочности бумажного листа в месте нахождения ТПВ происходит как за счет уменьшения клетчатки в этом месте, так и за счет искажения им поля.

5.4. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРНОЙ БУМАГИ

Промышленность выпускает различные типы конденсаторной бумаги, различающейся плотностью, толщиной листа, электрической прочностью, значениями $\operatorname{tg}\delta$ и характером его

Рис. 5.9. Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ различных типов бумаги от температуры:
сухих (1 — обычная; 2 — малопотерьная; 3 — оксидная) и пропитанных трихлордифенилом (4—6)



зависимости от температуры, гладкостью, влажностью [5.2, 5.3]. Плотности бумаг независимо от различий в других характеристиках лежат в пределах от 700 до 1400 кг/м^3, и обычный ряд составляет 800, 1000, 1200 и 1300 кг/м^3. Толщина листа составляет от 4 до 30 мкм. Технические характеристики, сортамент и маркировка выпускаемых в СССР бумаг регламентируются ГОСТ 1908-82. Назначение и основные качества бумаги отражаются в ее основном обозначении — КОН, дополнительные — добавкой к нему других букв. По этому ГОСТ изготавливаются следующие типы бумаги: обычная (КОН), специальная улучшенного качества (СКОН), с малыми потерями (МКОН), с малыми потерями и высокой электрической прочностью (ЭМКОН) и особо низкими потерями (ОМКОН). Бумага может изготавливаться односторонне гладкой (к обозначению добавляется буква О), с пониженной влажностью (буква Н) и увеличенной электрической прочностью (буква В) [5.2]. По техническим условиям ТУ 81-04-591-80 и ТУ 13-7310005-28-814 выпускается бумага с сорбирующим наполнителем — АНКОН и АНКОН Д. Обычная бумага [КОН, «Теркон» (фирма «Тервакоски», Финляндия), «Вольтек» (фирма «Боллоре», Франция) и аналогичные других изготовителей] является наиболее широко распространенной. При ее изготовлении не принимается никаких специальных мер по ее улучшению. Малопотерьная бумага [МКОН, «Терло» (фирма «Тервакоски»), «Вольтам» и «Изовольт» (Боллоре) и аналогичные бумаги других изготовителей] изготавливается из специальной особо чистой целлюлозы и на воде, прошедшей специальную очистку (деионизацию). Она имеет повышенное содержание целлюлозы и пониженную плотность, благодаря чему снижаются абсолютное значение $\operatorname{tg}\delta$ и температурная зависимость, и приближается к горизонтальной прямой как в непропитанном, так и в пропитанном состоянии (рис. 5.9). Если в конденсаторную бумагу в процессе ее изготовления добавить мелкодиспергированный сорбирующий материал, то получится бумага с наполнителем. Наиболее распространенным сорбентом является активный оксид алюминия Al_2O_3, который стабилизирует конденсаторный диэлектрик, сорбируя возникающие в нем в процессе эксплуатации ионные загрязнения. Такая бумага называется также оксидной, к ней относят типы

АНКОН и АНКОН Д, «Терокс» («Тервакоски»), «Изолям» («Боллоре») и аналогичные типы бумаги других изготовителей. Вместо Al_2O_3 возможно использование и других сорбентов (соединения бора [5.4] и др.).

Улучшение структуры бумажного листа при изготовлении позволяет повысить его электрическую прочность. Такая бумага при ее использовании в диэлектрике толщиной до 60 мкм позволяет повысить его электрическую прочность на 30—35% по сравнению с электрической прочностью такого же диэлектрика из обычной бумаги. При толщинах диэлектрика свыше 60 мкм эффекта увеличения электрической прочности при применении такой бумаги не наблюдается. Для импульсных конденсаторов с бумажно-касторовым диэлектриком фирма «Тервакоски» изготавливает специальную бумагу повышенной электрической прочности «Терокс» DPHV, в которую добавляется около 7% специального сорбента, связывающего загрязнения, возникающие в касторовом масле при эксплуатации. Ресурс конденсатора с диэлектриком из такой бумаги примерно на 60% выше, чем из обычной. Плотность бумаги составляет (1200±50) кг/м^3, допуск по толщине ±8%. Характер зависимости tg δ от температуры аналогичен зависимости для бумаги «Терокс Д». В табл. 5.1 приведены характеристики выпускаемых в СССР типов бумаги.

Таблица 5.1

Тип бумаги	γ, 10^3 кг/м^3	d_1, мкм	$U^*_{пр}$, В (сухая бумага)	ТПВ* на 1 м^2, не более	tg δ · 10^2 (сухая бумага) при	
					100° С	120° С
КОН	1,0 – 1,2	10—30 4—30	360 380	120 200	0,26 0,26	— —
СКОН	1,0 1,2 1,3	10—30 4—22 8—12	380/420** 400/440** 410/450**	60 100 120	0,20 0,24 0,32	— — —
МКОН	0,8 1,0 1,2 1,3	10—29 8—30 6—30 8—12	320/350** 380/420** 400/460** 420/480**	40 60 100 120	0,16 — 2 2	0,16 0,20 0,28 0,32
ЭМКОН	0,8 1,0 1,2 1,3	10—20 10—30 6—30 8—12	400/450** 450/550** 500/600** 560	40 60 100 120	— — — —	0,12 0,15 0,21 0,26
ОМКОН	1,0 1,2	8—12 8—12	500/550 500/550	30 65	— —	0,12 0,12

Тип бумаги	γ, 10^3 кг/м^3	d_1, мкм	$U^{*}_{пр}$, В (сухая бумага)	ТПВ* на 1 м^2, не более	$\mathrm{tg}\,\delta \cdot 10^2$ (сухая бумага) при	
					100° С	120° С
ОМКОН	1,2 1,3	8—12 8—12	550/600 570/630	80 100	— —	0,12 0,14
АНКОН	0,8 1,0	10—15 10—15	400 500	30 45	0,08 0,13	— —
АНКОН Д	0,8 1,0	10—15 10—15	400 500	30 45	0,09 0,13	— —

* Для толщины листа 10 мкм.
** Для бумаг типа В.

5.5. СИНТЕТИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРНЫЕ ПЛЕНКИ

Синтетические полимерные пленки, обладающие рядом ценных свойств, превосходящих свойства конденсаторной бумаги, являются заменителями последней в диэлектрике силового конденсатора. Одним из важнейших качеств синтетических пленок является их высокая электрическая прочность, превосходящая электрическую прочность бумаги, что позволяет снизить общую толщину конденсаторного диэлектрика и улучшить удельные характеристики конденсатора за счет повышения рабочей напряженности, сохранив при этом его оптимальный ресурс. Высокая электрическая прочность пленок обусловлена тем, что в отличие от бумаги они представляют собой монолитную систему и эквивалентная толщина листа пленки равна его фактической. Из всего многообразия пленок для применения в силовом конденсаторостроении пригодны только некоторые из них.

Электрические свойства синтетических полимерных пленок определяются строением полимеров, из которых они изготовлены, а строение полимеров, в свою очередь, зависит от химической природы мономерных звеньев, структуры макромолекулы и их взаимного расположения. По электрическим свойствам пленки делятся на полярные и неполярные. Характеристики некоторых неполярных пленок приведены в табл. 5.2.

Для неполярных пленок $\varepsilon_r = 2 \div 2{,}7$, $\mathrm{tg}\,\delta < 10^{-3}$, $\rho_v = 10^{17} \div 10^{19}$ Ом · см, ε_r и $\mathrm{tg}\,\delta$ не зависят от частоты, вплоть до сотен мегагерц. Нагревостойкость неполярных пленок может быть выше и ниже, чем у бумаги, в зависимости от природы пленки. Характеристики некоторых полярных пленок даны в табл. 5.3.

Таблица 5.2. **Характеристики неполярных пленок**

Пленка	γ, 10^3 кг/м^3	ε_r	$\mathrm{tg}\,\delta\cdot10^4$	ρ_v, 10^{16} Ом·м (при 20°С)	Θ_{max}, °С
Полистирольная	1,05	2,5—2,6	2—4	10	70
САМП*	1,05	2,6—2,7	3—4	10	90
Полиэтиленовая	0,91—0,06	2,2—2,25	4—5	10^{-1}	110
Полипропиленовая	0,89—0,9	2,2—2,3	3—6	10^{-1}	110
Политетрафторэтиленовая (фторопласт)	2,15	2—2,1	1—3	10	250

* Сополимер стирола и α-метилстирола.

Таблица 5.3. **Характеристики полярных пленок**

Пленка	γ, 10^3, кг/м^3	ε_{rn}	$\mathrm{tg}\,\delta\cdot10^4$	ρ_v, 10^{16} Ом·м	Θ_{max}, °С
Полиэтилентерефталатная (лавсан)	1,4	3,2	40—50	1	125
Поликарбонатная	1,2—1,3	3,0	8—12	5	140
Полиамидная	1,4	3—3,5	20—30	1	280
Поливинилденфторидная	1,8	11	120	10^{-3}	120

Как и для любого полярного материала, значения ε_r и $\mathrm{tg}\,\delta$ полярных пленок выше, чем у неполярных, и они сильно зависят от температуры и частоты. В температурной зависимости $\mathrm{tg}\,\delta$ наблюдается дипольный максимум. Нагревостойкость полярных пленок обычно выше нагревостойкости бумаги. Электрическая прочность пленок значительно выше электрической прочности бумаги ($E_{пр}>300$ МВ/м). Однако ввиду разнотолщинности пленочного листа она может быть различной в разных его точках. Поэтому при использовании однослойного пленочного диэлектрика он предварительно подвергается обработке повышенным напряжением («тренировке») в целях устранения мест с низкой электрической прочностью, что имеет особое значение для самовосстанавливающихся конденсаторов.

В процессе переработки пленок, например при намотке секций, на них возникают статические электрические заряды, благодаря чему возрастает опасность осаждения на пленку пылинок из атмосферы помещения. Наличие пылинок вызывает локальное искажение электрического поля в диэлектрике, что при высоких рабочих напряженностях приводит к быстрому отказу конденсатора. Поэтому при работе с пленками должны приниматься меры по предотвращению возникновения статического электричества; нормируются также степень запыленности помещения, где производятся работы, и размеры пылинок.

Пленка САМП и полистирольная в сочетании с нефтяным маслом, состоящим из нафтеновых и парафиновых фракций, использовались в конденсаторах повышенной частоты, что позволило отказаться от водяного охлаждения. Их широкое применение ограничивается низкой теплостойкостью. Полярные пленки заменили в ряде случаев конденсаторную бумагу в конденсаторах постоянного тока. Конденсаторы с пленочным диэлектриком без жидкого заполнения изготавливаются на напряжения, не превышающие нескольких сотен вольт. Использование их при более высоких напряженностях ограничивается возникновением частичных разрядов.

Пленка из изотактического полипропилена является основным материалом для диэлектрика конденсаторов, работающих на переменном напряжении. Изотактический полипропилен получается полимеризацией пропилена $CH_2—CH·CH_3$, в результате которой при определенных условиях образуется изотактическая структура (рис. 5.10), характеризуемая расположением радикала CH_3 по одну сторону от главной цепи. Эта пленка обладает достаточно хорошими электрическими и механическими характеристиками, теплостойкостью (температура плавления около 170° С и рабочая температура порядка 80° С) и химической стойкостью, допускающей работу в среде активных пропитывающих жидкостей (хлордифенилы, ароматизированные нефтяные масла и т. д.). Чем выше содержание изотактической фазы (в конденсаторном полипропилене она составляет 95%), тем выше механическая прочность и теплостойкость пленки. В результате беспорядочного расположения радикала CH_3 относительно главной оси образуется атактическая фаза, ухудшающая механические характеристики и растворяющаяся практически во всех применяемых для пропитки силовых конденсаторов жидкостях, что увеличивает $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика. Зольность пленки составляет 30—50 мг/кг. При вытягивании пленки вдоль ее длины и ширины (ориентирование) в процессе изготовления улучшаются механические характеристики.

Несмотря на более высокую стоимость пленки по сравнению с бумагой, бумажно-пленочный диэлектрик как основной диэлектрик силовых конденсаторов вытесняется многослойным пленочным. Он имеет более низкие потери, благодаря чему снижается расход энергии на потери в конденсаторах и удешевляется эксплуатация их, и, кроме того, позволяет уменьшить габариты и повысить надежность их. Для преодоления затруднений, возникающих

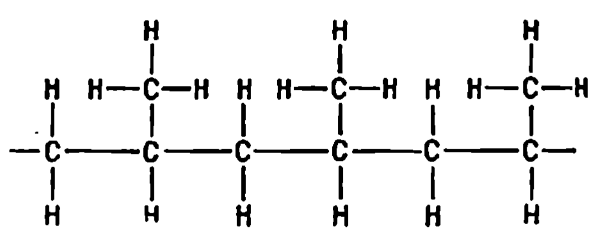


Рис. 5.10. Строение изотактического полипропилена

при пропитке пленочного диэлектрика, предложено много способов, суть которых сводится к созданию на поверхностях пленок и обкладок микрокапиллярной системы, обеспечивающей диффузию пропитывающей жидкости внутрь секции. Основным из них является термическая обработка поверхности пленки в процессе ее изготовления при температуре на 10° ниже точки плавления, при которой разрушается кристаллическая структура поверхностного слоя без разрушения структуры остальной ее части и он становится шероховатым («матовым»), что обеспечивает диффузию пропитывающей жидкости внутрь секции. Обработке могут быть подвергнуты одна или обе поверхности пленки, т. е. она может быть одно- или двусторонние-шероховатой.

Степень шероховатости является одной из важных характеристик пленки. Она оценивается наибольшим R_a или среднеарифметическим отклонением, и по этому параметру пленки делятся на три класса:

	R_a, мкм
Гладкие	0,05—0,07
Слабошероховатые	0,1—0,15
Шероховатые	0,30—0,60

Степень шероховатости может быть определена с помощью профилометра, как это делается при оценке чистоты обработки поверхности механических деталей, или по различию геометрической (ГТ) и весовой (ВТ) толщин. Под ГТ понимается поделенная на 10 толщина 10 листов пленки, измеренная микрометром с площадью 2 см^2 при давлении в 1 бар. Величина ВТ представляет собой частное от деления массы пленки с площадью в 1 см^2 на плотность полипропилена 0,905 г/см^3. Величина

$$s = (\text{ГТ} - \text{ВТ}) / 100\ \text{ВТ}$$

характеризует степень шероховатости.

Ее значения для различных классов пленок составляют:

	s, %
Гладкая	0.5—0,8
Слабошероховатая	1—2
Шероховатая	8—15

Гладкие и слабошероховатые пленки используются для металлизации или в однослойной диэлектрической системе с мягкими обкладками. В многослойном пленочном диэлектрике могут применяться только одно- или двусторонне-шероховатые пленки. Об обработке поверхностей обкладок см. в § 7.1.

Электрическая прочность односторонне-шероховатой пленки сохраняется на уровне электрической прочности гладкой пленки

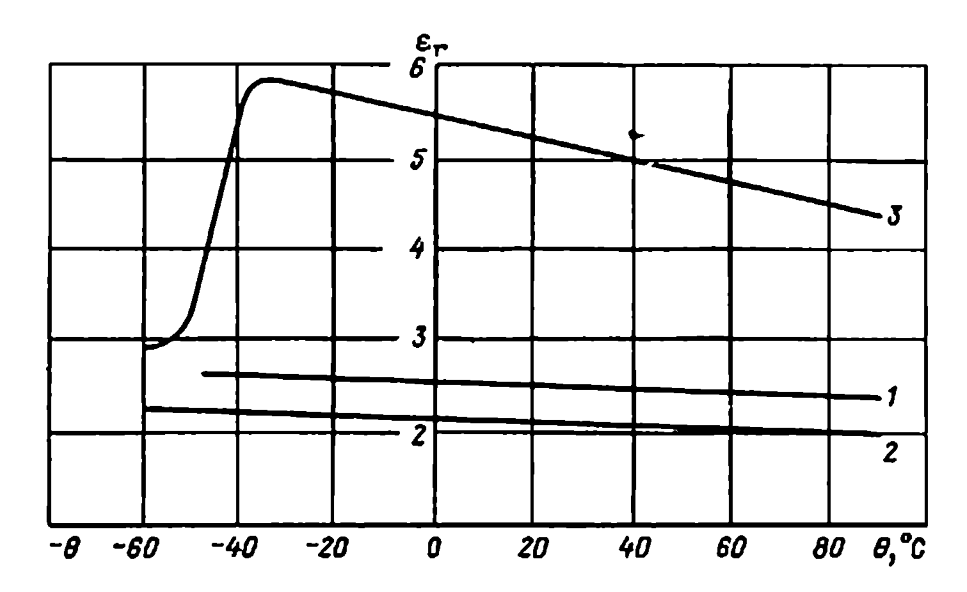


Рис. 5.11. Зависимость ε_r от температуры:
1 — нефтяное масло; 2 — полипропиленовая пленка; 3 — трихлордифенил

такой же толщины, у двусторонне-шероховатой она снижается. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры приведена на рис. 5.11 (кривая 2). Находясь в контакте с пропитывающей жидкостью (практически с любой из применяемых для пропитки силовых конденсаторов), пленка набухает. Степень набухания зависит от свойств жидкости, температуры и времени контактирования. Время набухания пленки уменьшается по экспоненциальному закону с увеличением температуры и может быть очень малым. Так, пленка толщиной 12 мкм набухает в трихлордифениле при температуре 100° С менее чем за 1 мин [5.6]. При набухании пленка увеличивает свою толщину, массу, диэлектрическую проницаемость и $\operatorname{tg}\delta$. Увеличение толщины и массы можно выразить количественно, с помощью формул

$$d' = k_d d; \tag{5.13}$$

$$m' = k_m m, \tag{5.14}$$

где d и m — толщина и масса ненабухшей пленки; d' и m' — то же набухшей пленки; $k_d > 1$ и $k_m > 1$ — экспериментально определяемые коэффициенты. Диэлектрическая проницаемость набухшей пленки рассчитывается по формуле Лихтенекера

$$\ln \varepsilon'_{r\text{п}} = x \ln \varepsilon_{r\text{п}} + (1 - x) \ln \varepsilon_{r\text{ж}},$$

в которой $\varepsilon_{r\text{п}}$ — диэлектрическая проницаемость ненабухшей пленки; $\varepsilon_{r\text{ж}}$ — то же жидкости; x — доля пленки, определяемая из уравнения баланса масс

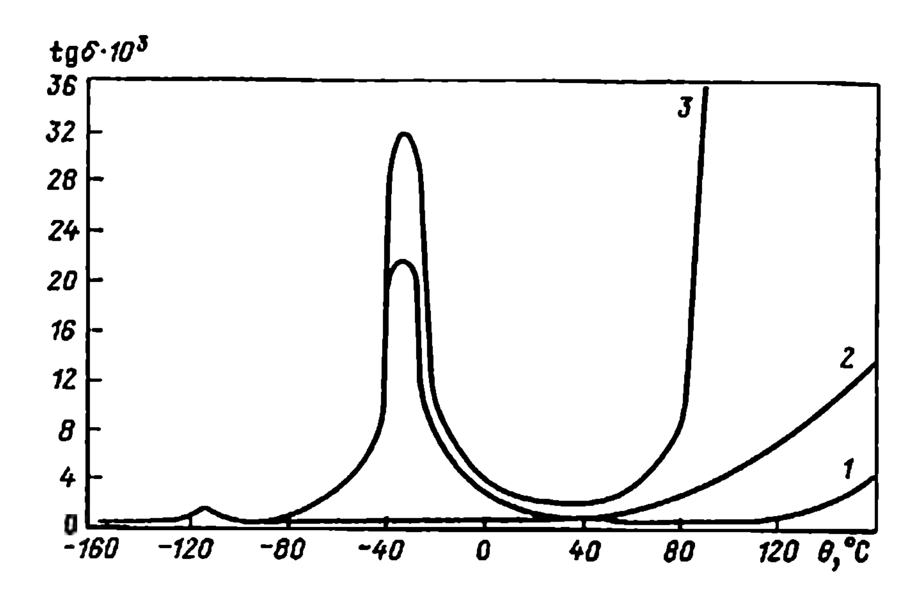


Рис. 5.12. Зависимость tgδ полипропиленовой пленки, набухшей трихлордифенилом, от температуры на частоте 50 Гц:
1 — исходная пленка; *2* — после выдержки в трихлордифениле 144 ч при температуре 100° С; *3* — то же при 140° С в течение 2 ч

$$x\gamma_п+(1-x)\gamma_ж=k_m x\gamma_п \quad \text{и} \quad x=\gamma_ж/\left[(k_m-1)\gamma_п+\gamma_ж\right],$$

где $\gamma_п$ — плотность пленки и $\gamma_ж$ — то же жидкости. После подстановки x в формулу Лихтенекера окончательно получим

$$\ln\varepsilon'_{rп}=\frac{\gamma_ж\ln\varepsilon_{rп}+(k_m-1)\gamma_п\ln\varepsilon_{rж}}{(k_m-1)\gamma_п+\gamma_ж}. \qquad (5.15)$$

Изменение tgδ пленки при набухании иллюстрируется рис. 5.12 [5.6], на котором кривой *1* представлена зависимость tgδ от температуры до контактирования ее с трихлордифенилом, кривой *2* — после контактирования при 100° С в течение 144 ч, кривой *3* — при 140° С в течение 2 часов. После контактирования в температурной зависимости tgδ появляется дипольный максимум при температуре, соответствующей температуре дипольного максимума tgδ трихлордифенила, и значение его возрастает с повышением температуры контактирования.

Увеличение толщины пленки при набухании должно учитываться при проектировании конденсаторов с пленочным и бумажно-пленочным диэлектриками путем выбора соответствующего значения коэффициента запрессовки. Для этих диэлектриков оно будет значительно меньше, чем в бумажном, и для каждого конкретного случая определяется по экспериментальным данным.

Глава шестая

ПРОПИТЫВАЮЩИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

6.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОПИТЫВАЮЩИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Пропитывающие материалы являются важным компонентом конденсаторного диэлектрика, в значительной мере влияющим на технико-экономические характеристики конденсатора. Как уже отмечалось выше, для пропитки силовых конденсаторов используются электроизоляционные жидкости. Требования, предъявляемые к пропитывающим материалам, весьма разнообразны. Они должны иметь высокую $\varepsilon_{r ж}$ и малый $\operatorname{tg}\delta_ж$, малую вязкость в диапазоне рабочих температур, высокую стабильность электрических характеристик, быть совместимыми со всеми материалами, применяемыми для изготовления конденсаторов, обладать высокой химической стойкостью и стойкостью к воздействию электрического и теплового полей конденсатора, а также малой испаряемостью и высокой температурой кипения, быть нетоксичными, негорючими, экологически совместимыми. Жидкостей, полностью удовлетворяющих приведенным требованиям, нет, однако для пропитки силовых конденсаторов может быть использован довольно широкий ассортимент полярных и неполярных жидкостей.

Неполярные жидкости, как и вообще неполярные материалы, имеют малые $\varepsilon_{r ж}$ и $\operatorname{tg}\delta_ж$ и высокое ρ_v. Пропитываемые ими конденсаторы имеют малые потери, но и невысокие удельные характеристики ввиду малой $\varepsilon_{r ж}$. Их диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты, а с понижением температуры слегка возрастает практически по линейному закону [см. (4.5) и рис. 5.11, кривая *1*] за счет увеличения числа молекул в единице объема. Дипольный момент неполярной жидкости ниже, чем полярной, поскольку ее молекулы не обладают собственным дипольным моментом.

Полярные жидкости имеют более высокие значения $\varepsilon_{r ж}$ и $\operatorname{tg}\delta_ж$, сильно зависящие от температуры и частоты. На рис. 6.1 приведены типичные зависимости $\varepsilon_{r ж}$, $\operatorname{tg}\delta_ж$ и электрической прочности полярной жидкости от температуры, а на рис. 6.2 показано влияние на них частоты. При температуре $\Theta_д$, соответствующей дипольному максимуму $\operatorname{tg}\delta_ж$ и характерной для каждой полярной жидкости, их динамические вязкости независимо от их происхождения, структуры и состава примерно одинаковы и составляют около $33 \cdot 10^5$ пуаза. При температуре $\Theta_м$ имеет место минимум $\operatorname{tg}\delta_ж$. Она является точкой раздела областей потерь с различными механизмами.

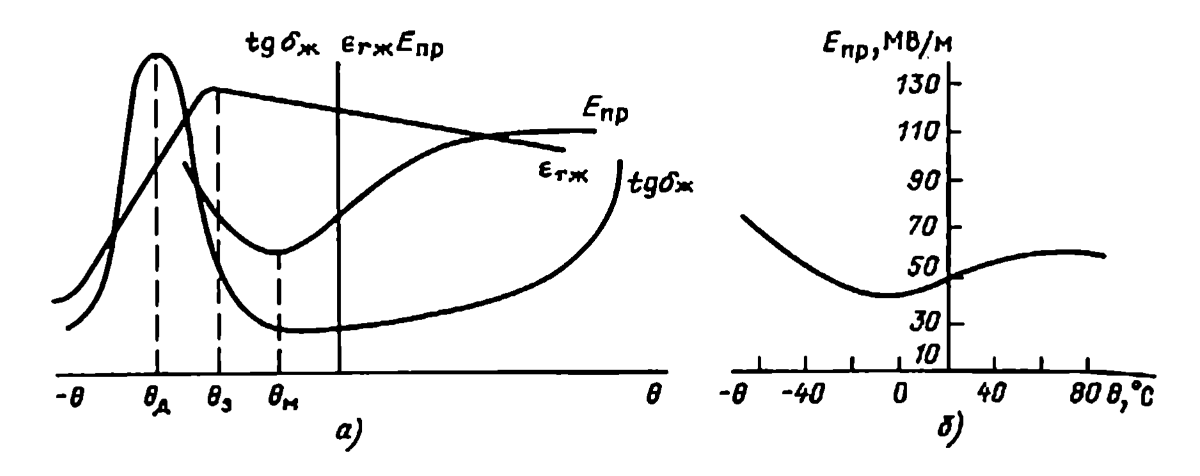


Рис. 6.1. Зависимости $\varepsilon_{r ж}$, $\operatorname{tg}\delta_ж$ и $E_{пр}$ полярной жидкости от температуры (*а*) и $E_{пр}$ трансформаторного масла от температуры (*б*)

Увеличение $\operatorname{tg}\delta_ж$ влево от $\Theta_м$ обусловлено чисто дипольным механизмом потерь, вправо — увеличением потерь от сквозной проводимости. Температуре $\Theta_м$ соответствует минимум электрической прочности. Третьей характерной температурой является температура $\Theta_з$, при которой начинается резкое снижение $\varepsilon_{r ж}$. Механизм этого явления рассмотрен в § 4.2. В застывшем состоянии полярная жидкость представляет собой твердое аморфное вещество, диэлектрическая проницаемость которого близка к диэлектрической проницаемости неполярного материала. Обратный перевод в жидкое состояние полностью восстанавливает полярные свойства и электрические характеристики. Абсолютные значения температур $\Theta_д$, $\Theta_з$ и $\Theta_м$ определяются природой полярной жидкости, но для каждой полярной жидкости независимо от ее происхождения, структуры и состава они связаны соотношениями

$$\Theta_м = \Theta_д + 30° \text{ C}; \quad \Theta_з = \Theta_д + 15° \text{ C}.$$

Высокое значение диэлектрической проницаемости полярных жидкостей обусловливает их высокую диссоциирующую способность, и поэтому они весьма чувствительны к загрязнениям. При попадании в жидкость загрязнения диссоциируют на ионы и резко повышают ее $\operatorname{tg}\delta$.

Зависимость динамической вязкости η от абсолютной температуры T описывается известной формулой

$$\eta = A \exp(B/T), \qquad (6.1а)$$

логарифмирование которой дает

$$\ln \eta = \ln A + B/T, \qquad (6.1б)$$

где A и B — параметры.

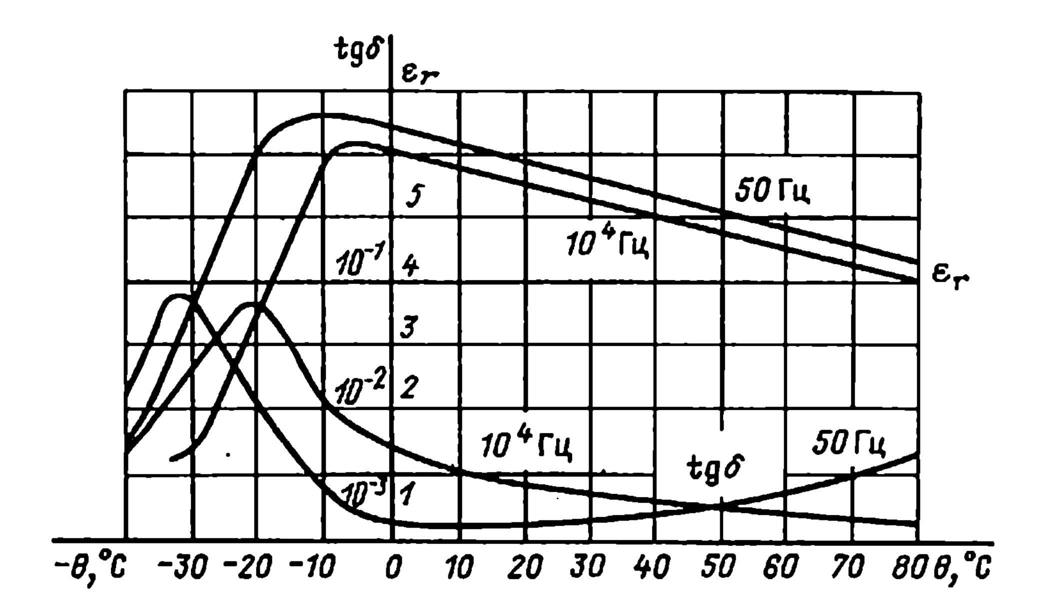


Рис. 6.2. Влияние частоты на $\varepsilon_{r ж}$ и $\text{tg}\,\delta_ж$ полярных жидкостей (трихлордифенил)

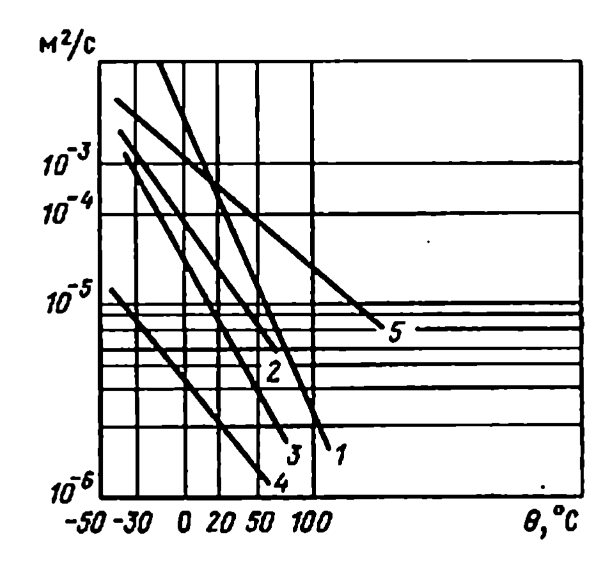


Рис. 6.3. Зависимость кинематической вязкости жидкостей от температуры: *1* — трихлордифенил; *2* — нефтяное масло; *3* — миксофлекс-1000; *4* — фенилксилилэтан; *5* — касторовое масло

Экспериментальные исследования вязкости различных жидкостей, применяемых для пропитки силовых конденсаторов, в диапазоне температур — 50 ÷ + 100° С показывают (рис. 6.3), что A и B не зависят от температуры. Из (6.1а) может быть определена температурная зависимость коэффициента диффузии:

$$D \approx A_1/\eta = C \exp(-B/T), \tag{6.1в}$$

где A_1 и C — константы.

Зависимости кинематических вязкостей некоторых пропитывающих жидкостей от температуры приведены на рис. 6.3.

Для температур, при которых $\text{tg}\,\delta_ж$ определяется сквозной проводимостью $\text{tg}\,\delta_ж = \gamma_ж \omega \varepsilon_ж$, зависимость

$$\ln \text{tg}\,\delta_ж = f(1/T)$$

представляет прямую линию, угол наклона которой к оси абсцисс одинаков с углом наклона прямой $\ln \eta = \varphi(1/T)$, но знак его отрицателен, т. е.

$$\ln \operatorname{tg} \delta_ж = \ln A' - B/T. \qquad (6.2)$$

Из (6.1б) и (6.2) следует

$$\operatorname{tg} \delta_ж \eta = \text{const}. \qquad (6.3)$$

В [6.3] для нефтяного масла получено соотношение

$$\operatorname{tg} \delta_ж \rho_v = 1{,}63 \cdot 10^{10}, \qquad (6.3а)$$

где ρ_v — удельное объемное сопротивление жидкости.

Как показано в [6.2], эта зависимость распространяется и на другие жидкости, применяемые для пропитки конденсаторов, и в общем случае имеет вид

$$\operatorname{tg} \delta_ж \rho_v = b = \text{const}, \qquad (6.4)$$

в котором значение b различно для каждой жидкости.

6.2. ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ, ГАЗОПОГЛОЩЕНИЕ И ГАЗОСТОЙКОСТЬ ЖИДКОСТИ

В процессе работы конденсатора молекулы пропитывающей жидкости могут разрушаться электрическим полем, например, вследствие возникновения начальных частичных разрядов. Характер продуктов разрушения и разрушающая напряженность определяются природой и структурой жидкости и условиями ее работы. Одной из важнейших характеристик пропитывающих жидкостей является количество газообразных продуктов, выделяемых при разрушении их молекул электрическим полем. Эту характеристику обычно называют газостойкостью. Чем большее количество газообразных продуктов выделяется жидкостью, тем менее газостойкой она считается, и наоборот. Часть выделяющегося газа растворяется в окружающей жидкости или связывается ею химически. Назовем этот процесс газопоглощением. Когда скорость газовыделения превосходит скорость газопоглощения, в конденсаторном диэлектрике образуется свободная газовая (третья) фаза в виде газовых пузырьков, наличие которых облегчает возникновение и значительно повышает интенсивность частичных разрядов (критические частичные разряды), приводящих к быстрому разрушению диэлектрика. В практике газостойкость определяется экспериментально, при этом результат испытаний столь сильно зависит от конструкции испытуемого образца, технологии его изготовления и условий испытания, что установление какой-либо связи между данными отдельных исследователей, получен-

ными различными методами, практически невозможно. Однако параметр, характеризующий газостойкость жидкости, коррелирует с ресурсом конденсатора.

Количественно газостойкость оценивается средней скоростью газовыделения

$$v = V_г / t, \qquad (6.5)$$

где $V_г$ — объем газа, выделившийся за время t, или просто объем выделившегося за время испытания газа.

Газостойкость может оцениваться объемом выделившегося из жидкости газа при затрате энергии в 1 Дж или коэффициентом газостойкости

$$B_г = v / P_{ч.р},$$

где $P_{ч.р}$ — мощность частичных разрядов. Значения $B_г$ составляют: для диоктилфталата $B_г = 4{,}3 \cdot 10^{-12}$ и фенилксилилэтана $B_г = 1{,}6 \cdot 10^{-12}$ м^3/Дж.

Выделившийся газ частично поглощается жидкостью, оставаясь частью растворенным, частью связанным химически. Поэтому газостойкость характеризуется не только количеством выделенного, но и количеством поглощенного газа. Значение имеет также и скорость его поглощения. Если скорость газопоглощения превосходит скорость газообразования, то возникновение свободной газовой фазы в диэлектрике замедляется. Из изложенного следует, что оценка газостойкости с учетом только скорости газопоглощения тоже недостаточна. Необходимо учитывать также и относительный объем поглощенного газа

$$v_{отн} = [V_г / V_ж] \cdot 100, \qquad (6.6)$$

где $V_ж$ — объем жидкости.

Объем растворенного в жидкости газа описывается законом Генри

$$V = (k_0 \pm \alpha\Theta) V_ж p / p_0, \qquad (6.7)$$

где k_0 — коэффициент растворимости при $\Theta = 0°$ С; α — температурный коэффициент растворимости; p — давление растворяющегося газа над жидкостью; $p_0 = 1{,}013 \cdot 10^5$ Па.

Объем растворяющегося в единицу времени газа, или скорость газопоглощения,

$$v_t = dV/dt = \beta(V_0 - V_t), \qquad (6.8)$$

где V_0 — максимальный поглощаемый жидкостью при данных условиях объем газа по (6.7); V_t — количество поглощенного газа к моменту времени t; β — коэффициент, характеризующий скорость газопоглощения.

Формула (6.8) может быть записана в виде

$$d(V_0 - V_t)/dt = -\beta(V_0 - V_t),$$

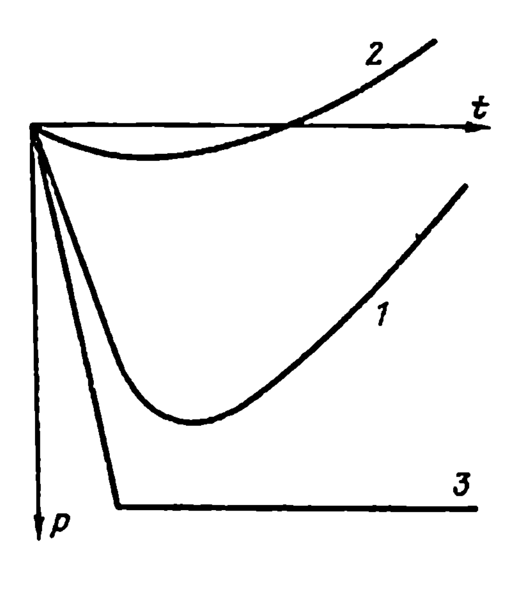


Рис. 6.4. Зависимости газостойкости нефтяного масла (1, 2) и трихлордифенила (3) от содержания влаги

интегрируя которую при начальных условиях $t=0$, $V_t=0$, получаем

$$V_t = V_0\left[1-\exp(-\beta t)\right]. \qquad (6.9)$$

Откуда после дифференцирования по t находим закон изменения скорости поглощения во времени

$$v_t = \beta V_0 \exp(-\beta t). \qquad (6.10)$$

Формула (6.10) показывает, что скорость поглощения, а следовательно, и отдачи газа не остается постоянной, а изменяется по экспоненциальному закону. Экспериментальная оценка газостойкости производится обычно в приборах типа Пирелли, Руммеля и др. Они представляют замкнутый стеклянный сосуд, в котором на границе раздела «испытуемая жидкость — газ» создается электрический разряд. Газовой средой, как правило, являются водород или воздух. Результаты испытаний представляются графически зависимостью давления газа в сосуде от времени испытаний (рис. 6.4), называемой кривой газостойкости. Прохождение кривой под осью абсцисс означает газопоглощение. Чем ниже точка минимума кривой и чем она дольше по времени не переходит ось абсцисс, тем выше газостойкость жидкости. Точка пересечения с осью абсцисс означает конец газопоглощения и начало повышения давления в сосуде по отношению к исходному, или газовыделение.

6.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Электрическая прочность пропитывающих жидкостей, количественно выражаемая напряженностью внешнего поля, при которой наступает пробой, является одной из важнейших характеристик. Она зависит от многих факторов: природы жидкости, ее температуры, степени увлажнения, количества растворенного в ней газа, степени очистки от загрязнений, а также конфигурации и материала электродов. Основным методом ее определения является экспериментальный. Для исключения влияния неоднородности поля электрическая прочность определяется в стандартном разряднике, электроды которого, выполненные из латуни, имеют форму шаровых

сегментов от шара диаметром 50 мм (наибольший диаметр электрода — 36 мм), высотой 13 мм, расстояние между которыми составляет (2,5±0,1) мм. Острые кромки в месте среза сегмента скругляются. Радиус скругления составляет 3 мм. Получение абсолютно чистых жидкостей, не содержащих загрязнений, практически неосуществимо, и в практике имеют дело с так называемыми технически чистыми жидкостями. В среднем электрическая прочность хорошо высушенных и обезгаженных технически чистых жидкостей, измеренная в стандартном разряднике, составляет 30—40 МВ/м. У неполярных жидкостей она несколько выше, чем у полярных. Жидкости с более высокой плотностью имеют и более высокую электрическую прочность. Электрическая прочность $E_{пр}$ является величиной стохастической. Ее распределение с достаточной для практики точностью может быть описано нормальным законом распределения с коэффициентом вариации около 10%.

Влияние увлажнения на $E_{пр}$ жидкости иллюстрируется рис. 6.5, на котором приведена зависимость $E_{пр}$ нефтяного масла от содержания влаги. Наличие влаги порядка 20—40 миллионных долей при 70° С может снизить $E_{пр}$ жидкости примерно на порядок. Существенное снижение электрической прочности жидкости может быть вызвано наличием у электродов ионизированных пузырьков газа диаметром от 10 мкм и более. Наличие пузырьков меньшего диаметра не влияет на $E_{пр}$. Для повышения электрической прочности жидкость необходимо максимально высушивать и обезгаживать. Эта технологическая операция производится под вакуумом обычно при температуре 80—85° С. Глубина вакуума определяется давлением насыщенных паров при соответствующей температуре. Наличие различных примесей (твердые частички, волокна и т. п.) также приводит к значительному снижению электрической прочности, и для ее повышения жидкости необходимо подвергать очистке. Так, например, неочищенное трансформаторное масло имеет $E_{пр} \approx 4$ МВ/м; после тщательной очистки она повышается до 20—25 МВ/м.

Влияние температуры Θ на $E_{пр}$ наиболее отчетливо можно наблюдать на примере полярных жидкостей. Зависимость $E_{пр} = E_{пр}(\Theta)$ для них имеет минимум (см. рис. 6.1) при температуре $\Theta_м$, значение $E_{пр}$ при которой может отличаться от значения $E_{пр}$ при температуре $\Theta = 90°$ С более чем

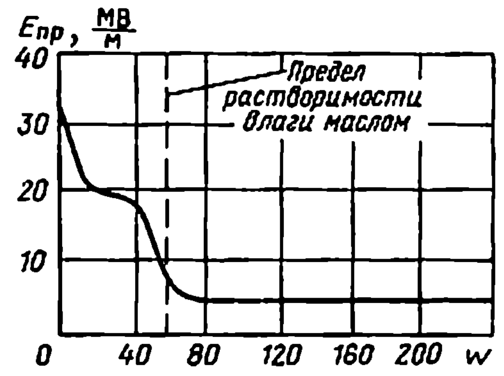


Рис. 6.5. Зависимость $E_{пр}$ нефтяного масла от содержания влаги w (миллионные доли)

в 2 раза. При понижении температуры сверх $\Theta_м$ значение $E_{пр}$ снова возрастает, что объясняется повышением вязкости жидкости и переходом ее в твердое состояние. Температурная зависимость $E_{пр}$ у неполярных жидкостей имеет аналогичный характер (см. рис. 6.1,*б*). В ней также имеется точка минимума $E_{пр}$, при переходе которой в сторону уменьшения температуры значение $E_{пр}$, как и у полярных жидкостей, возрастает, что также объясняется увеличением вязкости жидкости и переходом ее в твердое состояние. Наибольшее и наименьшее значения $E_{пр}$ у неполярных жидкостей в отличие от полярных отличаются всего на 25—30%. Это объясняется, по-видимому, влиянием дипольного взаимодействия поляризованных молекул жидкости. При большем дипольном моменте полярных жидкостей и снижении температуры (уменьшении расстояний между молекулами) оно усиливается, и $E_{пр}$ снижается. При повышении температуры картина будет обратной. У неполярных жидкостей величина $\mu_н$ меньше, чем μ полярных, и влияние дипольного взаимодействия становится меньше, чем в полярных, поэтому и $E_{пр}$ у них выше. Для полярных жидкостей при $\Theta>\Theta_м$ температурное изменение $E_{пр}$ хорошо описывается эмпирической формулой

$$E_{пр}=A-B[(T-T_л)/100]^b\exp[-c(T-T_д)/100], \qquad (6.11)$$

в которой $T=273+\Theta$; $T_д=273+\Theta_д$; A, B, b, c — опытные постоянные.

Зависимость $E_{пр}$ от Θ определяется также концентрацией влаги в жидкости. При $\Theta>\Theta_м$ рост $E_{пр}$ может происходить также за счет перехода влаги из эмульгированного в растворенное состояние.

Зависимость $E_{пр}(\varepsilon_ж)$ может быть представлена эмпирической формулой

$$\lg E_{пр}=-a\varepsilon_{гж}+C, \qquad (6.12)$$

в которой $a=5{,}88\cdot10^{-2}$ и C — опытная постоянная, определяемая в каждом конкретном случае.

Для жидкостей, содержащих газ, в небольших пределах изменения наблюдается зависимость

$$E_{пр}\approx35(1+11\cdot10^{-7}P), \qquad (6.13)$$

в которой единицы $E_{пр}$ — МВ/м и P — Па.

Толщина прослоек свободной жидкости в конденсаторном диэлектрике может достигать единиц и даже долей микрометра. В этом диапазоне толщин $E_{пр}$ жидкости существенно выше по сравнению с миллиметровым диапазоном. По [6.5] электрическая прочность жидкости в однородном поле при уменьшении толщины слоя от единиц миллиметров до долей микрометра возрастает по закону

$$E/E_0\approx A(d/d_0)^{-n}, \qquad (6.14)$$

где d_0 — толщина слоя жидкости в миллиметровом диапазоне; E_0 — электрическая прочность ее в этом диапазоне; соответственно d и E относятся к малым толщинам; A — постоянная. Для нефтяного масла $n \approx 0{,}4$.

6.4. НЕФТЯНОЕ МАСЛО

Конденсаторное нефтяное масло является старейшим пропитывающим диэлектриком в силовом конденсаторостроении. Оно отличается от трансформаторного более высокой степенью очистки. Химический состав нефтяного масла определяется составом нефти, из которой оно получается. Практически это смесь парафиновых, нафтеновых, ароматических и нафтено-ароматических углеводородов, а также их кислородных, сернистых и азотсодержащих производных. Структура составляющих нефтяное масло углеводородов настолько различна, что не представляется возможным точно определить индивидуальный тип молекулы. Поэтому обычно говорят о групповом составе масла.

Основным компонентом нефтяного масла являются нафтеновые углеводороды, занимающие 70—85 и в редких случаях 50—60% его состава. Они имеют пяти- или шестичленистую структуру с прямыми или разветвленными боковыми цепями, содержащими до 25 и более атомов углерода. Такое строение ближе соответствует нафтенопарафиновым углеводородам. Парафиновые углеводороды повышают температуру застывания масла, и поэтому их присутствие нежелательно.

Ароматические углеводороды, занимающие 10—40% состава масла, являются вторым его основным и необходимым компонентом. По своему строению ароматические углеводороды являются моно- и полициклическими системами, содержащими одно или несколько ароматических колец. Кроме ароматических часть углеводородов может содержать в молекуле также нафтеновые кольца, и их относят к нафтено-ароматическим; и ароматические, и нафтено-ароматические углеводороды имеют парафиновые боковые цепи.

Количественный и структурный состав ароматических углеводородов и их боковых цепей во многом определяет физико-химические и электрические характеристики масла — вязкость, стойкость к окислению, газостойкость и др. Масла с повышенным содержанием ароматических углеводородов (ароматики) имеют меньшую склонность к выделению газов (в основном водорода) под действием электрических разрядов и большую способность к их поглощению. Такие масла условно называются газостойкими. Масла с небольшим содержанием ароматики выделяют газ уже после непродолжительного воздействия электрических разрядов. Их условно называют

негазостойкими. Однако не вся ароматика в равной мере влияет на газостойкость масла. Наибольшее влияние на газостойкость оказывает средняя ароматика. Легкая и тяжелая ароматика оказывает существенно меньшее влияние, что объясняется, по-видимому, различным строением молекул. Полное удаление ароматики помимо снижения газостойкости масла приводит также к снижению стойкости масла против окисления (особенно при повышенных температурах) и каталитического воздействия металлов и света. Избыток ароматики, особенно полициклической, ухудшает tg δ масла. Регулируя соотношение между количеством ароматических и нафтеновых углеводородов при изготовлении масла, можно получать его требуемые характеристики. Допустимая рабочая температура для нефтяных масел в электротехнических аппаратах составляет 65—70° С. При длительном воздействии повышенной температуры в масле происходят процессы полимеризации, и образуется *х*-воск, резко ухудшающий его характеристики.

Масло для пропитки силовых конденсаторов выпускается по ГОСТ 5775-85 «Масла конденсаторные. Технические требования». Характеристики его приведены ниже.

Плотность, кг/м^3	860
Вязкость при 50° С, 10^{-6} м^2/с	9,8
Температура, °С:	
вспышки	158
застывания	−45
Кислотное число, мг КОН/г	0,005
Содержание серы, %	0,75
Нафтеновые, %	68,7
Ароматика, %:	
легкая	5,1
средняя	13,9
тяжелая	11,5
Смолы, %	0,83
Газостойкость по объему поглощенного газа, см^3, при:	
20° С	3,78
70° С	2,34
90° С	1,41
Газостойкость по относительному объему поглощенного газа, %, при:	
20° С	25
50° С	19
70° С	12
Газостойкость по скорости поглощения газа, см^3/ч, при:	
20° С	0,11
70° С	0,094
90° С	0,095
Электрическая прочность, МВ/м,	
не менее	20
$\varepsilon_{r ж}$ при 20° С	2,1—2,3
tg $\delta_ж$ при 100° С, не более	0,005
Коэффициент объемного расширения, 1/°С	$6{,}5 \cdot 10^{-4}$

Стандартное масло является маслом средней газостойкости. Разработаны специальные нефтяные конденсаторные масла с повышенным содержанием ароматики, имеющие более высокую скорость газопоглощения, поглощающие больший объем газов по сравнению со стандартным и имеющие температуру застывания до −60° С, что позволяет использовать их для пропитки конденсаторов, предназначенных для работы в северных районах. Предельные растворимости газов (% по объему) в нефтяном масле (насыщенный раствор при 20° С и атмосферном давлении) приведены ниже.

Воздух	10
Азот	8,56
Кислород	65,9
Водород	4
Углекислота	125
Азот как часть воздуха	6,98
Кислород как часть воздуха	3,03

Малая диэлектрическая проницаемость, высокая температура застывания, горючесть, низкая газостойкость и образование *х*-воска в процессе эксплуатации обусловили необходимость замены нефтяного масла другими пропитывающими жидкостями. Оно находит ограниченное применение только для пропитки конденсаторов, рабочие напряженности у которых невелики и от которых требуется высокая стабильность емкости при изменении температуры и частоты (конденсаторы связи, для делителей напряжения и т. п.). Синтетические углеводородные масла на основе полиизобутиленов не образуют *х*-воска при длительном воздействии повышенной температуры, но они имеют более высокую температуру застывания по сравнению с нефтяным маслом. Остальные характеристики полиизобутиленов такие же, как и у нефтяных масел.

6.5. КАСТОРОВОЕ МАСЛО

Касторовое масло, являющееся полярной жидкостью, состоит из смеси триглицеридов, представляющих сложные эфиры глицерина и высокомолекулярных жирных кислот — стеариновой и диоксистеариновой (около 3%), олеиновой (3—9%), линолевой (2—3%) и рицинолевой (80—93%). Молекула рицинолевой кислоты

$$CH_3(CH_2)_5-CHOCH_2CH=(CH_3)_7COOH$$

представляет вытянутую цепь длиной около 2,7 нм и поперечным размером порядка 0,212 нм.

Она содержит две группы OH, обусловливающие полярность касторового масла. Химический состав касторового масла в значительной мере зависит от климатических условий

произрастания клещевины — исходного продукта для его получения. Касторовое масло практически не окисляется на воздухе и поэтому относится к невысыхающим маслам. Типичные характеристики его приведены ниже.

Плотность, кг/м^3	960
Вязкость, м^2/с:	
при 20° С, не менее	10^{-3}
при 90° С	$1{,}8\cdot10^{-5}$
Температура вспышки, °С	275
Температура застывания, °С	$-17\div-33$
Кислотное число, мг КОН/г	1,28
$\varepsilon_{rж}$ при:	
20° С	4,45
90° С	3,9
$\operatorname{tg}\delta_ж$ при:	
20° С	0,001
90° С	0,06
ρ_r, Ом·см, при 100° С	$3\cdot10^{11}$
Содержание золы, %	0,1
Коэффициент объемного расширения, 1/°С	$7\cdot10^{-4}$

Зависимость электрических характеристик от температуры показана на рис. 6.6. Характерные температурные точки лежат при следующих температурах: $\Theta_д=-45°$ С; $\Theta_з=-30°$ С и $\Theta_м=-15°$ С. При застывании касторовое масло образует довольно мягкую эластичную массу. Газостойкость касторового масла превосходит газостойкость нефтяных масел с большим содержанием ароматики. Рабочая температура касторового масла в аппаратах не более 70° С. Как и всякая полярная жидкость, касторовое масло чувствительно к загрязнениям. После воздействий высокой температуры $\operatorname{tg}\delta_ж$ масла значительно возрастает вследствие химических изменений, и оно плохо

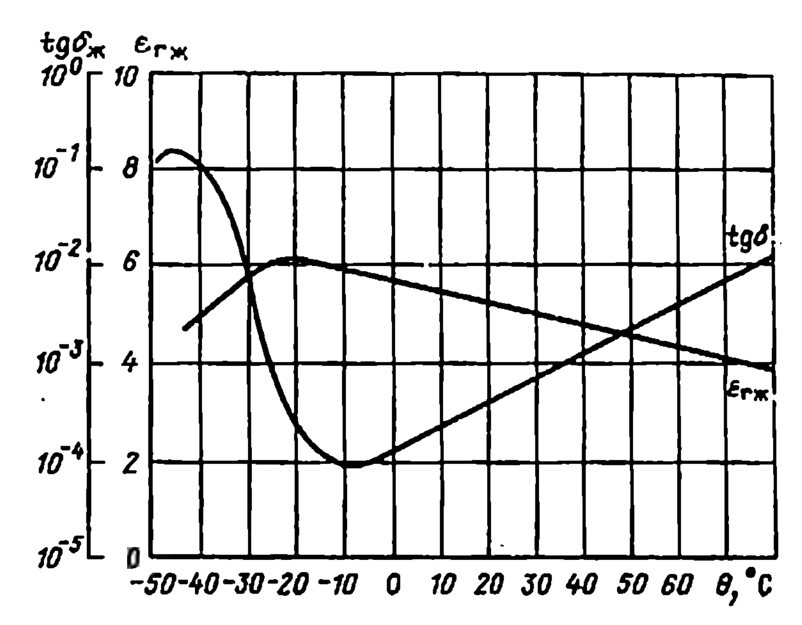


Рис. 6.6. Зависимость $\varepsilon_{rж}$ и $\operatorname{tg}\delta_ж$ касторового масла от температуры

поддастся очистке даже такими эффективными сорбентами, как смесь глины КИЛ с алюмогелем. Основное применение касторового масла — пропитка бумажного диэлектрика импульсных конденсаторов, что позволяет получить более высокие удельные характеристики по сравнению с другими пропитывающими жидкостями (нефтяное масло, хлордифенилы). Ввиду большого $tg\,\delta_ж$ пропитка касторовым маслом конденсаторов, работающих на переменном напряжении, нецелесообразна.

6.6. ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ ХЛОРИРОВАННЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ

На основе жидких хлорированных углеводородов может изготавливаться большое количество жидкостей с широким спектром электрических и физико-химических характеристик, делающих их пригодными для пропитки конденсаторов, работающих как на переменном, так и на постоянном напряжении. Наибольшее распространение получили жидкости на основе продуктов хлорирования дифенила $C_{12}H_{10}$ — полихлордифенилы, из которых три-тетра- и пента-хлордифенилы и их модификации более 30 лет занимали практически монопольное положение во всем мире как пропитывающие жидкости для конденсаторов переменного тока. Это объясняется тем, что помимо высоких электрофизических характеристик — высокой диэлектрической проницаемости, высокой газостойкости — они обладают еще одним свойством, отсутствующим у нехлорированных углеводородов,— негорючестью, обусловленной наличием в их молекуле атомов хлора. Но наличие атомов хлора делает хлордифенилы очень устойчивыми к разрушению естественными механизмами при попадании в окружающую среду (биодеградации), что приводит к их накапливанию в ней. Следы хлордифенилов обнаружены в арктических льдах. Особо устойчивы к биодеградации хлордифенилы с большим содержанием хлора (от тетрахлордифенила и выше). Это вызвало широкую кампанию против их промышленного применения, в результате которой последовало их запрещение во всем мире. Подробно свойства хлорированных жидкостей изложены в [1.1]. Запрещение применения хлордифенилов потребовало поиска их заменителей, в результате которых предложено большое количество жидкостей (см. § 6.7), и поиски продолжаются. Для пропитки конденсаторов с бумажным и бумажно-пленочным диэлектриком, требование негорючести к которым является основным, французской фирмой «Проделек» вместо хлордифенилов предложены следующие хлорированные жидкости: «Южилек ТС» — представляет смесь тетрахлорбензолтолуола

с эпоксидной добавкой и «Южилек С21» — смесь дихлорбензолтолуола с эпоксидной добавкой. Некоторые их характеристики приведены ниже.

	«Южилек ТС»	«Южилек С21»
Плотность, г/см^3	1,42	1,225
Вязкость, 10^{-6} м^2/с:		
−30° С	1000	2000
20° С	11	14
50° С	4	4,5
Температурный коэффициент объемного расширения, 1/°С	$7{,}6\cdot10^{-4}$	$7{,}6\cdot10^{-4}$
Температура вспышки, °С	136	190
ε_r при:		
20° С	5,25	5,7
90° С	4,6	5,13
$\operatorname{tg}\delta_ж$ при 90° С (50 Гц)	$4\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-3}$

Широкого распространения эти жидкости, однако, не получили.

6.7. ПРОПИТЫВАЮЩИЕ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ЗАМЕНЫ ХЛОРДИФЕНИЛОВ

В связи с запрещением по экологическим соображениям применения хлордифенилов для пропитки силовых конденсаторов встал вопрос о разработке заменителей. Был разработан ряд пропитывающих жидкостей, хотя и не полностью эквивалентных по своим свойствам хлордифенилам главным образом вследствие их горючести, однако применяемых в промышленном порядке для пропитки силовых конденсаторов. Ниже приведен перечень наиболее распространенных из этих жидкостей, их коммерческие названия и фирмы-изготовители.

Пропитывающие жидкости для замены хлордифенилов

Жидкость	Коммерческое название	Фирма-изготовитель
Фенилксилилэтан (ФКЭ)	Конденсаторное масло S (Диэлектрол III)	Nippon Chem. Co, Япония
Диоктилфталат (ДОФ)	Миксофлекс 1000	Prodelec, Франция
	Хэткол	Hatko, США
	Диэлектрол I	Gen. El. Co, США
Смесь диоктилфталата с трихлорбензолом	Диэлектрол II	Gen. El. Co, США
Бензилнеокапринат (БНК)	BNK	Prodelec, Франция
Изопропилдифенил (ИПД)	Суресол	Sun Oil Co, США
	Вемкол	Westinghouse, США
	Танакол	Tanatex, США
Алкилированный и хлорированный дифенилоксид (АХДО)	ОС 4800	Bayer, ФРГ

Бутилированный монохлордифенилоксид	Элисол (XFS-4169, жидкость С4, эконол)	Dow Chemicl, США
Диизононилфталат (ДИНФ)	Байэлектрол 4200	Bayer, ФРГ
Дитолилэфир (ДТЭ)	Байэлектрол 4900	Bayer, ФРГ
Смесь моно-и-дибензилтолуола +1% эпоксида (МДБТ)	Жарилек С 101 (Южилек С 101)	Prodelec, Франция

Химические формулы и структуры молекул жидкостей приведены из рис. 6.7, а физико-химические и электрические параметры — в табл. 6.1.

Фенилксилилэтан (*ФКЭ*) — неполярная жидкость, представляющая собой (в отличие от нефтяного масла) один тип углеводородных молекул.

Диоктилфталат (*ДОФ*) — полярная жидкость с диэлектрической проницаемостью, близкой к диэлектрической проницаемости хлордифенилов. Она является сложным эфиром, получающимся в результате реакции фталевой кислоты с октиловым (этилгексиловым) спиртом.

Бензилнеокапринат (*БНК*) — слабополярная жидкость.

Изопропилдифенил (*ИПД*) — жидкость с очень слабо выраженными полярными свойствами, состоящая из одного типа углеводородов.

Алкилированный и хлорированный дифенилоксид (*АХДО*) — полярная жидкость с диэлектрической проницаемостью, меньшей диэлектрической проницаемости хлордифенилов. Частным случаем АХДО является бутилированный монохлордифенилоксид (БМХДО).

Диизононилфталат (*ДИНФ*) — полярная жидкость, получаемая в результате реакции фталевой кислоты и диизононилового спирта.

Дитолилэфир (*ДТЭ*) — слабополярная жидкость.

Смесь моно-и-дибензилтолуола плюс 1% эпоксида (*МДБТ*) — слабополярная жидкость, состоящая из 75% моно- и 25% дибензилтолуола.

Из табл. 6.1 видно, что в числе жидкостей-заменителей (поиски которых продолжаются), используемых для пропитки силовых конденсаторов, имеются как полярные, так и неполярные или слабополярные жидкости. Пропитанные ими конденсаторы не уступают, а в ряде случаев даже превосходят характеристики конденсаторов с хлордифениловой пропиткой. Все жидкости имеют высокую газостойкость, а температура их застывания и плотность ниже, чем у хлордифенилов. Основным недостатком всех жидкостей-заменителей является их горючесть.

Жидкости-заменители, как и хлордифенилы, также абсорбируются пленкой. Процесс абсорбции сильно зависит от температуры и пропорционален экспоненте $\exp(-K/T)$, где T —

Рис. 6.7. Структуры молекул пропитывающих жидкостей:
а — ФКЭ $C_{15}H_{18}$; *б* — ДОФ $CH_4[COO(CH_2)_7CH_3]_2$; *в* — БНК $C_9H_{19}COOCH_2C_6H_5$; *г* — ИПД $C_{15}H_{16}$; *д* — АХДО $C_{12}H_{9-n}Cl_nR$; *е* — ДТЭ $C_{14}H_{14}O$; *ж* — МБТ $C_{14}H_{17}$; *з* — ДБТ $C_{21}H_{25}$

Таблица 6.1. **Параметры жидкостей**

Параметр	ФКЭ	ДОФ	ДОФ+ +ТХБ	БНК	ИПД	БМХДО*	ДИНФ	ДТЭ	МДБТ
Плотность при 20° С, кг/м^3	989	980	1080	960	990	1090	970	1035	1006
Вязкость при 20° С, (м^2/с)·10^6	8	80	13	6	9	15	125	5,8	6,[illegible]
ε_r при:									
20° С	2,5	5,25	5,47	3,75	2,83	4,4	4,7	3,5	2,66
90° С	2,3	4,2	4,4	3,2	2,4	3,7	4,0	3,2	—
$\mathrm{tg}\,\delta\cdot 10^3$ при 100° С	8	20	—	20	10	10	30	3	4
Температура застывания, °С	−48	−46	−52	−60	−55	−45	−54	−32	−50
Температура вспышки, °С	148	216	152	155	155	174	215	146	144
Скорость газопоглощения по [6.7], мкл/мин, при:									
30° С	57	—	34	50	79	58	—	—	—
80° С	138	—	147	113	154	65	—	—	—

* Бутилированный монохлордифенилоксид.

Примечания: 1. Скорость газопоглощения определялась по методике рекомендации МЭК 628 в атмосфере водорода.

2. Скорость газовыделения для трихлордифенила при тех же температурах по [6.14] составляет соответственно −20 и −31 мкл/мин.

3. Скорость поглощения H_2 жидкостью МДБТ по данным фирмы составляет 2,3 см^3/ч.

абсолютная температура. Его длительность в худшем случае составляет не более 15 ч, при этом пленка значительно набухает. Увеличение толщины пленки при набухании составляет от 4% при 50° С до примерно 15% при 110° С, при этом доля увеличения толщины за счет теплового расширения составляет 1,5 и 4%. Смачиваемость пленки зависит как от ее свойств, так и свойств жидкости. В общем случае наблюдается тесная связь между углом смачивания и начальной скоростью пропитки. Скорость растворения пленки ниже скорости абсорбции. Количество растворенной пленки очень сильно зависит от температуры и характеризует, скорее, качество пленки, чем влияние жидкости, хотя в некоторых случаях явно выражается влияние жидкости.

6.8. КРЕМНИЙ- И ФТОРОРГАНИЧЕСКИЕ ЖИДКОСТИ

В связи с тем, что кремний- и фторорганические жидкости имеют низкие температуры застывания и малые вязкости, предпринимались попытки их использования для пропитки силовых конденсаторов. Кремнийорганические (полиорганосилоксановые) жидкости являются полимерными соединениями, характеризующимися наличием звена Si—O—Si. Их можно разбить на следующие основные группы: 1) полиметилсилоксановые (ПМС), у которых с кремнием соединяется метиловый радикал CH_3; 2) полиэтилсилоксановые (ПЭС) - содержит этиловую группу C_2H_5; 3) полиметилфенилсилоксановые (ПМФС)—содержат метильные и фенильные радикалы; 4) полихлор (фтор)—органосилоксановые, у которых метильные и фенильные группы в той или иной степени заменены атомами хлора или фтора. Большинство этих жидкостей имеют низкую (−60° С и ниже) температуру застывания и низкие значения вязкости, незначительные изменения электрических характеристик в широком интервале изменения температуры и частоты, высокую термическую и противокислительную стабильность, совместимы со многими конденсаторными материалами. Плотность большинства жидкостей составляет (9,4—9,8)·10^2 кг/м^3, и только у полимеров, содержащих фенильные или галоидные радикалы, доходит до (1,2—1,4)·10^3 кг/м^3. Температура вспышки колеблется от 145—150 до 290° С. При температурах, превышающих температуру вспышки, жидкости воспламеняются даже без контакта с открытым пламенем. Из-за малой $\varepsilon_ж$, низкой газостойкости, горючести и, главным образом, высокой стоимости кремнийорганические жидкости находят весьма ограниченное применение для пропитки силовых конденсаторов.

Фторированная жидкость фторол, представляющая собой фторированный эфиртриметилглутарат $C_{20}H_{14}F_{24}O_4$ имеет температуру застывания ниже −60° С. Она бесцветна, нетоксична, не имеет запаха. Ее $\varepsilon_{rж}=6{,}1$, т. е. выше, а $\operatorname{tg}\delta_ж$ ниже, чем у хлордифенилов. Температурное изменение $\varepsilon_{rж}$ в интервале температур от −80 до +120° С меньше, чем у хлордифенилов. Характеристики частичных разрядов конденсаторов, пропитанных этой жидкостью, лучше, чем при пропитке хлордифенилами. Однако высокая стоимость фторированных жидкостей затрудняет их широкое применение.

6.9. ДРУГИЕ ПРОПИТЫВАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

По аналогии с применением твердеющих пропитывающих масс для пропитки некоторых типов конденсаторов для радиоэлектроники предпринимались попытки создать силовой

конденсатор с твердой пропиткой, в частности с пропиткой термореактивным компаундом. При этой пропитке возможно некоторое упрощение конструкции, например металлический корпус, служащий для герметизации и механической защиты внутренних элементов конденсатора, становится излишним, поскольку герметизация может быть осуществлена путем создания внешней оболочки из того же компаунда. В некоторых специальных случаях применение эпоксидной пропитки позволяет создать простой и удобный конденсатор, однако пока не удалось создать силовой конденсатор с твердой пропиткой, эквивалентный по своим свойствам конденсатору с жидкой пропиткой.

Фирма «Сименс» впервые применила для заполнения («пропитки») разработанных ею «сухих» силовых конденсаторов с диэлектриком из металлизированной полипропиленовой пленки элегаз — шестифтористую серу SF_6. По данным фирмы это не только полностью исключает окисление и разрушение металлизированных обкладок и мест контактирования кислородом и влагой воздуха, остающегося в конденсаторе в отсутствие жидкого заполнения, что улучшает его характеристики, но и дополнительно снижает потери в нем.

Глава седьмая

ОБКЛАДКИ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

7.1. ФОЛЬГОВЫЕ ОБКЛАДКИ

Алюминиевая фольга, используемая в качестве обкладок при изготовлении намотанных секций силовых конденсаторов с бумажным, бумажно-пленочным и пленочным диэлектриком, выпускается по ГОСТ 618-73. Она содержит 99,5—99,7% алюминия. Применение алюминия обосновано тем, что он обладает небольшим удельным сопротивлением, высокой теплопроводностью, легко прокатывается до малых толщин и относительно дешев. В конденсаторах других типов применяются также фольговые обкладки из других материалов: оловянная — 84—85% Sn, 13—14% Pb, 1—2% Sb, красномедная, танталовая. Алюминиевая фольга для электролитических конденсаторов содержит 99,95—99,99% алюминия.

В подавляющем большинстве силовых конденсаторов применяется алюминиевая фольга толщиной 7—8 мкм. Временное сопротивление разрыву этой фольги, не подвергавшейся отжигу

и называемой жесткой, должно быть не менее $7,5 \cdot 10^5$ Па при удлинении не менее 0,5%. Для удаления следов технологической смазки, загрязняющей диэлектрик конденсатора и ухудшающей его tg δ, фольга отжигается. Такая фольга называется мягкой, и удлинение ее достигает 2%, но прочность на разрыв понижается. Как показывает опыт, без ущерба для технических характеристик конденсатора толщина фольги с 7—8 мкм может быть снижена до 5—6 мкм. В конденсаторах для повышенных частот (электротермических) применяется фольга толщиной 16 мкм.

В бумажном и бумажно-пленочном диэлектрике применяется гладкая фольга. В пленочном диэлектрике гладкая фольга слипается с пленкой, что препятствует проникновению пропитывающей жидкости, в результате чего целые участки диэлектрика остаются непропитанными и содержат воздух. Для устранения этого фольга делается тисненой, и через канавки тиснения обеспечивается полная пропитка диэлектрика [7.1].

В намотанных секциях поверхность обкладок сравнительно велика по сравнению с объемом диэлектрика, прилегающего к ней. Это усиливает каталитическое воздействие алюминия на химические и электрохимические процессы старения. При постоянном напряжении и повышенных температурах наличие алюминия приводит к быстрому разложению хлорированных полярных жидкостей, что имеет следствием возрастание проводимости и сокращение ресурса конденсатора. При этом на поверхности фольги, особенно анодной, находящейся под положительным потенциалом, наблюдается сильное коррозионное разрушение. В переменном электрическом поле металлические фольговые обкладки могут вибрировать, в результате чего увеличиваются потери. Повышением коэффициента запрессовки можно снизить эффект от этого явления.

7.2. ОБКЛАДКИ В ВИДЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Обкладки в виде металлизированного диэлектрика получаются испарением металла в вакууме (до 10^{-4} мм рт. ст.) и осаждением его на поверхность диэлектрического материала с образованием металлического слоя и обычно называются металлизированными. Этот термин будет сохранен и в дальнейшем. Металлический слой может осаждаться непосредственно на диэлектрик, и тогда обкладка и диэлектрик образуют единую систему, или на отдельную диэлектрическую подложку, как, например, лист бумаги, и тогда обкладка является самостоятельным элементом. Процесс образования слоя металлизации зависит от многих факторов: физических свойств

металла и поверхности, определяющих сродство металла к поверхности, температуры поверхности и др. Осаждение молекул металла на поверхности диэлектрика может происходить только в том случае, когда температура поверхности T меньше некоторой критической температуры $T_к$. При $T>T_к$ молекулы металла не закрепляются на поверхности диэлектрика, и она остается чистой.

При попадании на поверхность диэлектрика молекула металла закрепляется на нем, отдавая избыточную кинетическую энергию молекулам диэлектрика, и участвует вместе с ними в тепловом движении. Время пребывания молекулы в закрепленном состоянии определяется степенью сродства металла с поверхностью и ее температурой. При больших T это время невелико, и молекула металла быстро отрывается от поверхности в окружающее пространство. В этом случае при малой интенсивности потока падающих на поверхность молекул металла образуется рыхлый молекулярный слой. При низкой температуре поверхности, обусловливающей большое время пребывания молекулы в закрепленном состоянии, и большой интенсивности потока молекул металла создаются условия для образования полимолекулярного слоя. Поскольку молекулы металла в последующих слоях, кроме первого, сцепляются друг с другом, силы сцепления возрастают, и процесс отдачи молекул в окружающее пространство затрудняется. Значения $T_к$ различны для различных потоков молекул металла. Процесс металлизации осуществляется в специальных установках.

Металл, используемый для изготовления обкладок из металлизированного диэлектрика, должен исключать возможность их разрушения или окисления в процессе работы конденсатора и обеспечивать в то же время его надежное самовосстановление после пробоя диэлектрика. Кроме того, он должен иметь малое сопротивление, низкую температуру кипения, а упругость его паров должна быть высокой при сравнительно низких температурах, поскольку применяемые в силовом конденсаторостроении изоляционные материалы отличаются малой теплостойкостью в силу их органической природы. Металлы с низкой температурой кипения требуют также меньших затрат энергии в процессе металлизации. Температуры кипения некоторых металлов, °С, в вакууме приведены ниже.

Кадмий	260
Цинк	340
Алюминий	1000
Серебро	1050
Медь	1270
Олово	1350

Самую низкую температуру кипения имеет кадмий. Но он дорог и поэтому не применяется для металлизации.

Следующим идет цинк. Однако тонкие пленки цинка на конденсаторном диэлектрике в атмосферных условиях быстро окисляются, в результате чего увеличивается их сопротивление, и поэтому секции с металлизированными цинком обкладками могут только кратковременно храниться в обычных условиях. Кроме того, оксиды цинка обладают полупроводящими свойствами, в результате чего самовосстановление может быть неполным. От указанных недостатков цинка свободен алюминий, который хотя и имеет более высокую температуру кипения по сравнению с цинком, но широко применяется для металлизации.

Самовосстановление конденсаторов с обкладками из металлизированного диэлектрика зависит от многих факторов: толщины слоя металлизации; свойств металла, химического состава материала, на который она наносится; натяжения лент при намотке (плотности намотки). Основным и определяющим является толщина слоя металлизации. Для улучшения самовосстановления, а также снижения разрушения и окисления металлизированных обкладок применяется ряд специальных мер, рассматриваемых далее.

7.3. САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ С ОБКЛАДКАМИ В ВИДЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИКА

При пробое диэлектрика в конденсаторе с обкладками из металлизированного диэлектрика под действием возникающей между ними дуги и протекающего через место пробоя тока происходит испарение металла обкладок (их деметаллизация) вокруг места пробоя. Деметаллизированная зона имеет форму круга. Процесс деметаллизации продолжается до тех пор, пока дуга не погаснет, т. е. пока не восстановятся электроизоляционные свойства диэлектрика в данной его точке и конденсатор снова не станет работоспособным. Следовательно, его длительность и затрачиваемая при этом энергия должны быть такими, чтобы исключалась возможность повреждения самого диэлектрика. Оба эти значения определяются количеством подлежащего испарению металла, которое, в свою очередь, зависит от размеров зоны деметаллизации и толщины слоя металлизации δ. Диаметр круга деметаллизации определяется приложенным к обкладкам напряжением. Следовательно, для уменьшения времени процесса деметаллизации и затрачиваемой на него энергии необходимо уменьшать δ. С уменьшением δ возрастает сопротивление обкладок, что увеличивает $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора и потери в нем. Задача сводится к нахождению оптимального значения δ. Изучению процесса деметаллизации посвящен ряд исследований [7.2].

Непосредственное измерение толщины δ, составляющей сотые доли микрометра, практически чрезвычайно трудно, и поэтому она оценивается по сопротивлению слоя металлизации. Если взять металлизированную обкладку в форме квадрата, то ее сопротивление

$$r = \rho/\delta, \qquad (7.1)$$

где ρ — удельное сопротивление металла обкладки.

Из уравнения следует, что сопротивление r квадрата при известном ρ является характеристикой толщины слоя δ. Но величина ρ сама является функцией δ. Эта зависимость объясняется тем, что в начальный период образования слоя металлизации, когда количество молекул металла на поверхности диэлектрика невелико, они не образуют сплошного слоя, а располагаются разрозненно, и ρ в этом случае велико. В процессе миграции при тепловом движении по поверхности диэлектрика молекулы металла сталкиваются друг с другом и образуют группы, происходит осаждение других молекул, и ρ уменьшается вследствие уменьшения расстояния между группами. После достижения слоем определенной толщины значение ρ становится постоянным, равным ρ сплошного куска металла. Поэтому расчет δ по сопротивлению r квадрата может дать лишь приближенное значение, поскольку ρ зависит от δ до толщины слоя 0,1 мм в зависимости от его плотности. Температурный коэффициент α сопротивления металла также зависит от толщины (рис. 7.1). Характер зависимости энергии разрушения металлизированной обкладки от ее толщины при металлизации цинком, полученной в [1.7], приведен на рис. 7.2. Оптимальные толщины слоя металлизации, характеризуемые сопротивлением квадрата, несколько различаются для различных материалов, на которые они наносятся, а также используемых для металлизации металлов (цинк, алюминий) и находятся в пределах 1—3 Ом.

Процесс самовосстановления может быть улучшен путем применения ряда дополнительных мер [7.4—7.8]. Во избежание образования проводящих мостиков между обкладками проводящие продукты (частицы металла, свободный углерод) должны быть приведены в непроводящее состояние. Это достигается образованием их соединений с кислородом или водородом, в результате чего получаются непроводящие оксиды металлов, CO, CO_2 и газообразные углеводороды. Насыщение поверхностей подложек или пленки диэлектрика кислородом и водородом или соединениями с большим количеством кислорода и водорода способствует этому. Для надежного самовосстановления необходимо, чтобы молекула материала подложки или металлизированной пленки содержала не менее 10% атомов кислорода, т. е. должна иметь не менее чем 10%-ный

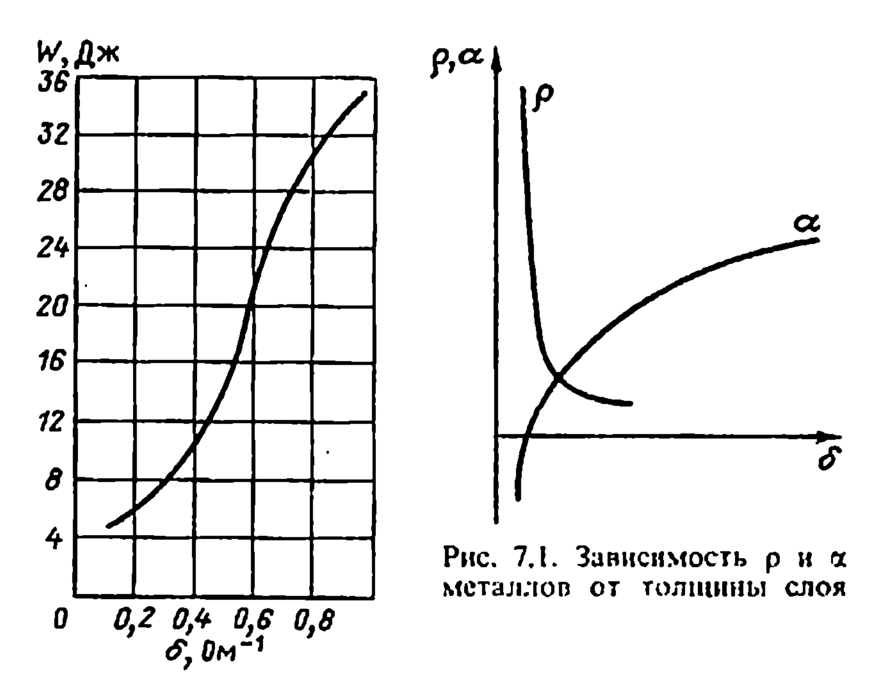


Рис. 7.1. Зависимость ρ и α металлов от толщины слоя

Рис. 7.2. Зависимость энергии разрушения слоя металлизации от его толщины (по Тороцину)

оксидационный баланс. Клетчатка, как основа мягкой обкладки, содержит большое число кислородных атомов в молекуле (обладает высоким оксидационным балансом), поэтому в системе с мягкой обкладкой в качестве диэлектрика могут быть использованы пленки с малым оксидационным балансом, тогда как в металлопленочной—только пленки с высоким оксидационным балансом. Для подложек, обладающих 10%-ным оксидационным балансом при металлизации их цинком, оптимальной будет толщина слоя металлизации, при которой проводимость квадрата не превышает 0,8 См [7.3]. Для связывания частиц металла в металлопленочной системе с малым оксидационным балансом в пропитывающий диэлектрик добавляется жидкий полиметилсилоксан со степенью полимеризации около 300.

При работе на постоянном напряжении в конденсаторах с металлизированными алюминием обкладками наблюдается явление электрохимического упрочнения, которое состоит в следующем. При наличии в диэлектрике конденсатора мест с малым сопротивлением изоляции через них протекает сквозной ток, имеющий большее значение по сравнению с током, протекающим по участку с нормальным сопротивлением изоляции. Разлагая остатки влаги, он способствует повышенному выделению кислорода у анодной обкладки, которым окисляется алюминий. Образующийся при окислении тонкий слой оксида алюминия Al_2O_3 обладает хорошими электроизоляционными свойствами, благодаря чему сопротивление изоляции этого участка возрастает и уменьшается ток утечки.

7.4. РАЗРУШЕНИЕ СЛОЯ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

Приложенное к обкладкам напряжение разрушает слой металлизации обкладок как вследствие электролитических процессов и переноса металла с анодной обкладки, так и частичными разрядами. При электролитическом разрушении скорость его можно оценить с помощью уравнения, предложенного Мак-Лином:

$$-\frac{d\delta}{dt}=\frac{\varepsilon_a U M}{0{,}64 d n \gamma_м \tau}, \qquad (7.2)$$

где δ — толщина слоя металлизации, нм; U — приложенное напряжение, В; ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; M — атомная масса; n — валентность и $\gamma_м$ — плотность металла, которым выполнена металлизация, г/см^3; d — толщина диэлектрика, мкм; τ — постоянная времени конденсатора.

Разрушение цинковой металлизации может происходить при повышенной температуре и в отсутствие электрического поля. Пропитка конденсаторов с обкладками из металлизированного диэлектрика ускоряет процесс их разрушения. Обкладка на основе металлизированного неполярного диэлектрика разрушается быстрее, чем полярного, поскольку адгезионные силы у него меньше, чем у полярного. В целях улучшения адгезии на подлежащий металлизации материал наносится слой из галогеносодержащего синтетического электроизоляционного материала, на который затем наносится слой алюминия. Для защиты от окисления слой металлизации из алюминия покрывается защитным слоем из свинца, олова, цинка, толщина которого составляет от 1 нм и выше. Для уменьшения разрушения слоя металлизации из алюминия к нему рекомендуется добавлять до 5% меди.

Глава восьмая

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНОГО КОНДЕНСАТОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

8.1. РАСЧЕТ ε_r И $\mathrm{tg}\,\delta$ МНОГОСЛОЙНОГО ПРОПИТАННОГО БУМАЖНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

При расчетах используется последовательная эквивалентная схема рис. 4.3, *б* с учетом коэффициента запрессовки k. Влияние его на электрические характеристики диэлектрика, а также

количественные соотношения были исследованы одним из авторов книги (Н. И. Назаровым) в 1957 г. [8.1, 8.2], а влияние на характеристики частичных разрядов — И. Ф. Переселенцевым в 1958 г. в [8.2]. Если диэлектрик состоит из n слоев сухой бумаги с толщиной листа d_1, то согласно § 5.2 толщина клетчатки в нем будет составлять

$$d_к = nd_1\gamma/\gamma_к, \tag{8.1а}$$

а эквивалентная толщина жидкости, находящейся в порах бумажных листов, которую условно будем называть «связанной»,

$$d'_ж = (1-\gamma/\gamma_к)nd_1. \tag{8.1б}$$

К этому добавляются прослойки «свободной» жидкости, находящейся между слоями бумаги из-за неплотного прилегания их друг к другу, эквивалентная толщина которых $d''_ж$ определяется как разность между общей толщиной диэлектрика nd_1/k и толщиной бумаги nd_1:

$$d''_ж = (nd_1/k) - nd_1 = (1-k)nd_1/k. \tag{8.1в}$$

Суммарная толщина жидкости в эквивалентной схеме равна:

$$d_ж = d'_ж + d''_ж = (1-k\gamma/\gamma_к)nd_1/k. \tag{8.1г}$$

Указываемая в каталогах и справочниках на бумагу плотность γ' относится к увлажненной бумаге. Плотность сухой бумаги связана с плотностью увлажненной соотношением

$$\gamma = (100-w)\gamma'/100, \tag{8.2}$$

где w — влажность бумаги, %.

Для конденсаторных бумаг в среднем $w = 8\%$. Формулы для расчета ε_r и $\operatorname{tg}\delta$ многослойного пропитанного бумажного диэлектрика получаются аналогично формулам в § 5.2 с использованием формул (8.1а), (8.1г) и (8.2) и имеют вид

$$\varepsilon_r = \frac{\beta\varepsilon_{rк}}{1-\gamma_п(1-\beta)}; \tag{8.3}$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\beta\gamma_п\operatorname{tg}\delta_к + (1-\gamma_п)\operatorname{tg}\delta_ж}{1-\gamma_п(1-\beta)}, \tag{8.4}$$

где $\gamma_п = (100-w)k\gamma'/100\gamma_к$ — приведенная относительная плотность бумаги; $\beta = \varepsilon_{rж}/\varepsilon_{rк}$.

Формулы (8.3) и (8.4) отличаются от формул (5.2б) и (5.5) только наличием в них коэффициента запрессовки, являющегося конструктивным фактором. Точность расчета ε_r по формуле (8.3) составляет 4—6%. В отношении точности расчета $\operatorname{tg}\delta$ сохраняет силу сказанное в § 5.2 относительно расчета $\operatorname{tg}\delta$ одиночного листа.

8.2. РАСЧЕТ ε_r И $\operatorname{tg}\delta$ БУМАЖНО-ПЛЕНОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИКА

При расчетах емкость конденсатора с бумажно-пленочным диэлектриком $C=\varepsilon_a S/d$ представляется как последовательное соединение (см. рис. 1.3) емкостей с диэлектриками из клетчатки $C_к=\varepsilon_{aк}S/d_к$, набухшей пленки $C_п=\varepsilon'_{aп}S/d'_п$ и жидкости $C_ж=\varepsilon_{aж}S/d_ж$ и равна:

$$C=C_к C_п C_ж/(C_к C_п+C_к C_ж+C_п C_ж). \qquad (8.5)$$

Подставим в (8.5) значения $C_к$, $C_п$ и $C_ж$, толщины диэлектриков в которых составляют $d_к=nd_1\gamma/\gamma_к$ [определяется из формулы (8.1а) с использованием (8.2)], набухшей пленки $d'_п=k_d n'd'_1$ и жидкости

$$d_ж=(1-\gamma_п)nd_1/k+(1-kk_d)n'd'_1/k, \qquad (8.6)$$

являющейся суммой толщин слоев «связанной» (находящейся в порах бумаги) и «свободной» (находящейся между листами бумаги и пленки) жидкости.

После преобразований с использованием формулы (3.3) получим

$$\varepsilon_r=\beta\varepsilon_{rк}/\Psi_\varepsilon, \qquad (8.7а)$$

где Ψ_ε вычисляется по формуле (3.3) с заменой в ней [с учетом формулы (8.2)] $k\gamma/\gamma_к$ на $\gamma_п$.

С учетом набухания можно записать

$$\operatorname{tg}\delta/C=\operatorname{tg}\delta_к/C_к+\operatorname{tg}\delta'_п/C_п+\operatorname{tg}\delta_ж/C_ж,$$

где $\operatorname{tg}\delta'_п$ — тангенс угла потерь набухшей пленки.

После подстановок и преобразований с учетом формулы (8.7а) получим

$$\operatorname{tg}\delta=\{\varkappa\beta\gamma_п\operatorname{tg}\delta_к+(1-\gamma)kk_d\varepsilon_ж\operatorname{tg}\delta'_п/\varepsilon'_п+ +[\varkappa(1-\gamma_п)+(1-\gamma)(1-kk_d)]\operatorname{tg}\delta_ж\}/\Psi_\varepsilon. \qquad (8.7б)$$

При $\varkappa=1$ получаются формулы для расчета параметров бумажного, при $\varkappa=0$ — пленочного диэлектриков. Расчет $\operatorname{tg}\delta$ по (8.7б) имеет качественный характер не только вследствие влияния факторов, о которых говорилось выше, но также и потому, что некоторые пропитывающие жидкости растворяют аморфную часть пленки и повышают $\operatorname{tg}\delta$, что трудно учесть. В последующем, при работе конденсатора, он снижается. Для уменьшения влияния этого эффекта рекомендуется при изготовлении пленок производить более тщательную очистку исходного продукта от примесей и увеличивать число поперечных связей облучением. При применении пленки с малым количеством ионных примесей $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов длительно может оставаться неизменным.

8.3. КРАТКОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ

Кратковременная электрическая прочность $E_{пр}$ конденсаторного диэлектрика количественно оценивается отношением пробивного напряжения $U_{пр}$ к расчетной толщине диэлектрика d_c, т. е. напряженностью электрического поля: $E_{пр}=U_{пр}/d_c$. Она зависит от многих факторов: толщины диэлектрика, площади обкладок, температуры, частоты, формы воздействующего напряжения. На рис. 8.1 приведена экспериментальная зависимость $E_{пр}$ от толщины изоляции d_c. При определенной (оптимальной) толщине $d_c=d_{c max}$ в ней наблюдается максимум $E_{пр}$. Снижение $E_{пр}$ при $d_c>d_{c max}$ обусловлено увеличением искажения поля на краю обкладки с ростом толщины изоляции, а при $d_c<d_{c max}$ — увеличением влияния сквозных пор и токопроводящих включений. При неизменной толщине изоляции изменение толщины одиночного бумажного листа приводит к изменению $E_{пр}$. С уменьшением его толщины $d_{c max}$ сдвигается в сторону меньших значений d_c ввиду снижения числа сквозных пор. На рис. 8.2 приведена экспериментальная зависимость $d_{c max}$ от толщины листа. У обычных конденсаторных бумаг с толщиной листа 10—11 мкм максимум $E_{пр}$ наблюдается при $d_{c max}=40\div50$ мкм. Значения $E_{пр}$ пропитанного бумажного диэлектрика имеют значительный разброс, и среднеквадратическое отклонение σ возрастает с уменьшением толщины. Для $50\leqslant d_c\leqslant80$ мкм $\sigma=(0{,}07\div0{,}1)E_{пр.ср}$. При толщинах, близких к оптимальной, распределение пробивных напряжений описывается нормальным законом. Пропитанный диэлектрик из бумаг с повышенной электрической прочностью имеет $E_{пр}$ на 25—30% выше по сравнению с обычными бумагами (при $d_c\leqslant40$ мкм). При $d_c>40$ мкм этого преимущества не наблюдается. С увеличением плотности γ бумаги ее электрическая прочность увеличивается.

В пропитанном бумажном диэлектрике электрическая прочность его компонентов — клетчатки и пропитывающей жидкости — различна, и поэтому изменение соотношения их толщин может менять характер пробоя диэлектрика. При некотором соотношении толщин слоев клетчатки $d_{к0}$ и жидкости $d_{ж0}$ они будут равнопрочными, и повышение напряжения до пробивного сразу приведет к полному пробою. При $d_к>d_{к0}$ $E_{пр}$ диэлектрика определяется электрической прочностью клетчатки, и пробой носит последовательный характер: вначале наступает пробой жидкости, в результате чего возникают критические частичные разряды, и только при дальнейшем повышении напряжения наступает полный пробой. При соотношении толщин, когда $E_{пр}$ диэлектрика определяется электрической прочностью пропитывающей жидкости, также сразу наступает полный пробой.

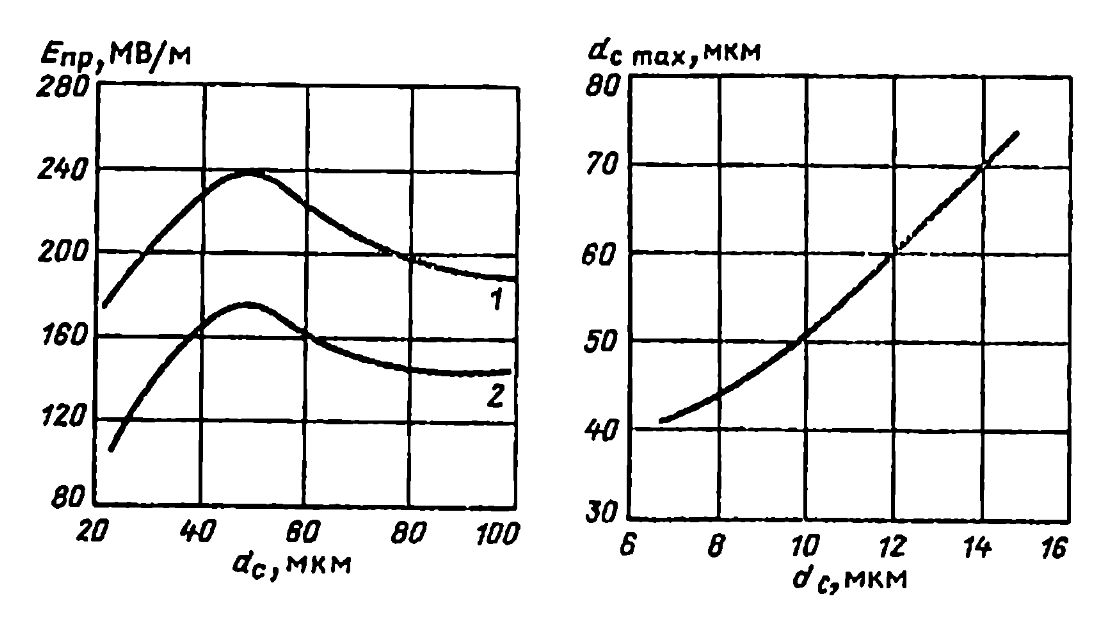


Рис. 8.1. Зависимость $E_{пр}$ от d_c бумажного диэлектрика (бумага КОН-I толщиной 10 мкм) при постоянном (*1*) и переменном (*2*) напряжении (амплитудные значения), пропитка — трихлордифенил

Рис. 8.2. Зависимость $d_{c\,max}$ от толщины листа

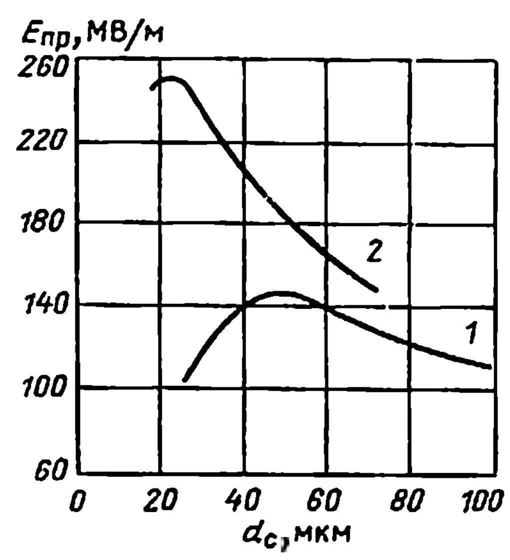
В реальном конденсаторном диэлектрике толщина слоя жидкости зависит и от коэффициента запрессовки k, однако $E_{пр}$ диэлектрика практически не изменяется с изменением k, хотя расчетная пробивная напряженность, определенная по формуле (2.3), изменяется значительно. Последняя, являясь условной величиной, в свете изложенного механизма пробоя, основанного на теории последовательного пробоя, не отражает истинной картины явления и не может служить критерием для оценки электрической прочности диэлектрика. Электрическая прочность секции, рассчитанная по прочности клетчатки, при различных коэффициентах запрессовки остается практически неизменной. Это показывает, что электрическая прочность секции в первую очередь определяется электрической прочностью ее твердой фазы. Однако и свойства пропитывающей жидкости также оказывают на нее определенное влияние. Исследования показывают, что при $\varepsilon_ж < \varepsilon_к$ в электрической прочности пропитанного бумажного диэлектрика с повышением $\varepsilon_ж$ наблюдается небольшая, но четкая тенденция к ее росту.

Применение синтетической пленки в качестве компонента конденсаторного диэлектрика значительно повышает его электрическую прочность и снижает разброс. Это объясняется большей по сравнению с бумагой однородностью пленок и большей их электрической прочностью, превышающей 300 МВ/м. Максимум в кривой $E_{пр}=f(d_c)$ в диэлектрике с синтетической пленкой сдвигается в область малых толщин, как это видно из рис. 8.3.

Характер зависимости $E_{пр}=f(d_c)$ практически одинаков как для постоянного, так и для переменного напряжения. Значение $E_{пр}$ при постоянном напряжении примерно вдвое выше действующего значения $E_{пр}$ при переменном напряжении промышленной частоты. Объясняется это тем, что на переменном напряжении в предпробивной период возникают частичные разряды. Они появляются при напряжениях, более низких, чем пробивное, их интенсивность возрастает с увеличением напряжения, что приводит к частичному разрушению твердой фазы еще до наступления пробоя. Различие в характеристиках частичных разрядов объясняет некоторую разницу в значениях $E_{пр}$ при переменном напряжении при пропитке диэлектрика различными жидкостями. Влияние характеристик жидкости на $E_{пр}$ пленочного и бумажно-пленочного диэлектрика зависит от соотношения $\varepsilon_{rж}$ и $\varepsilon_{rп}$.

В диапазоне рабочих температур силовых конденсаторов значение $E_{пр}$ их изоляции несколько изменяется с изменением температуры. Для бумажно-масляного диэлектрика $E_{пр}$ независимо от рода напряжения линейно зависит от температуры: снижается во всем рабочем диапазоне температур от -60 до $+80^\circ$ С. Для бумажного диэлектрика, пропитанного полярными жидкостями, зависимость $E_{пр}$ от температуры в области до дипольного максимума $\operatorname{tg}\delta$ также имеет линейный характер: понижается с повышением температуры. Электрическая прочность такого диэлектрика при температурах, соответствующих зоне дипольного максимума, исследована недостаточно. По-видимому, в этом диапазоне следует ожидать снижения $E_{пр}$, так как характеристики частичных разрядов здесь существенно ухудшаются. Кратковременная электрическая прочность пленочного диэлектрика также несколько снижается с повышением температуры. С повышением частоты воздействующего напряжения кратковременная электрическая прочность бумажной изоляции снижается, как это показано на рис. 8.4. Такой ход зависимости можно объяснить влиянием частичных разрядов в предпробивной период, интенсивность которых при прочих равных условиях увеличивается с ростом частоты.

При воздействии несинусоидального напряжения электрическая прочность $E_{пр}$ обычно определяется как отношение действующего значения пробивного несинусоидального напряжения к толщине диэлектрика. Однако определенная таким образом $E_{пр}$ не всегда правильно характеризует электрическую прочность изоляции, так как на ее значение существенное влияние может оказывать амплитудное значение напряжения. Форма напряжения зависит от гармонических составляющих и их начальных фаз. Изменением начальных фаз гармоник можно изменять форму напряжения, т. е. изменять ее наибольшее мгновенное значение или амплитуду без изменения дейст-



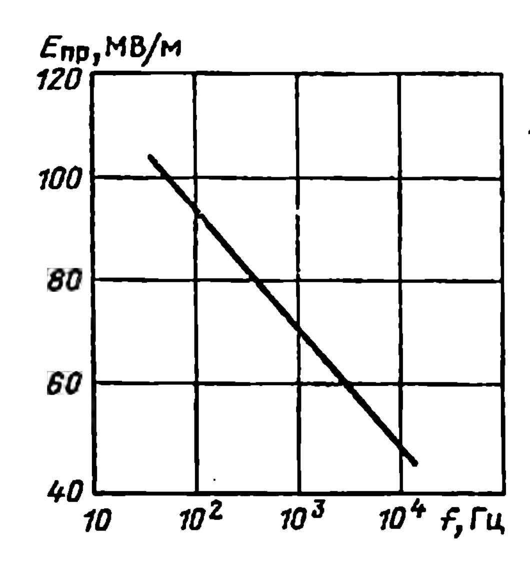


Рис. 8.3. Зависимость $E_{пр}$ бумажного (*1*) и бумажно-пленочного (*2*) диэлектриков от d_c (действующие значения). Содержание пленки — 50%, пропитка — трихлордифенил

Рис. 8.4. Зависимость $E_{пр}$ бумажно-масляного диэлектрика от частоты

вующего значения. Наличие пиков в несинусоидальной кривой может влиять на длительную электрическую прочность. Это обстоятельство следует учитывать при проектировании конденсаторов для работы при несинусоидальном напряжении.

Уровень кратковременной электрической прочности при воздействии импульсного напряжения может быть различным. При одиночном кратковременном униполярном импульсе $E_{пр}$ будет больше, чем при постоянном напряжении. Повышение частоты следования импульсов снижает $E_{пр}$ вследствие эрозии диэлектрика частичными разрядами. Значение $E_{пр}$ при импульсном напряжении должно определяться в каждом конкретном случае.

Электрическая прочность бумажно-масляного диэлектрика при смешанном напряжении $E_{пр.см}$, содержащем постоянную $E_=$ и переменную $E_\sim$ частотой 50 Гц составляющие, зависит от их соотношения:

$$\alpha = E_= / (E_\sim + E_=), \tag{8.8}$$

и изменяется от значения электрической прочности $E_{пр\sim}$ на переменном напряжении ($\alpha = 0$) до значения $E_{пр=}$ на постоянном напряжении ($\alpha = 1$). Эта зависимость хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией

$$E_{пр.см} = E_{пр\sim} + (E_{пр=} - E_{пр\sim}) \left[1 - \exp - \frac{\alpha}{(1-\alpha)B} \right], \tag{8.9}$$

где $B \approx 4$ — экспериментальная постоянная.

Совпадение токопроводящих включений (ТПВ) в разных листах бумаги в направлении силовых линий электрического поля приводит к появлению в диэлектрике слабых мест. При небольшой площади обкладок вероятность совпадения двух ТПВ мала, и можно считать, что каждое включение шунтирует только один лист бумаги. В этом случае для двух слоев $U_{пр}$ определяется прочностью только одного листа, для трех — двумя, четырех — тремя и для n слоев — прочностью $n-1$ листов. Таким образом, при $d_c < d_{c\,max}$

$$U_{пр} = E_{0б}(n-1)d_1, \qquad (8.10)$$

где $E_{0б}$ — электрическая прочность пропитанного бумажного листа при отсутствии включений.

Средняя электрическая прочность

$$E_{пр} = U_{пр}/nd_1 = E_{0б}(n-1)/n. \qquad (8.11а)$$

Если в диэлектрике, состоящем из n листов, ТПВ совпадают в q листах, то

$$E_{пр} = E_{0б}(n-q)/n. \qquad (8.11б)$$

Вероятность совпадений ТПВ в q из n листов диэлектрика

$$W_n^q = \binom{n}{q} p_0^q S_0^{q-1} S, \qquad (8.12)$$

где $\binom{n}{q}$ — число сочетаний из n по q; p_0 — вероятность попадания ТПВ на 1 см^2 листа бумаги; S_0 — эффективная площадь включения; S — активная площадь листа. Полученная формула позволяет найти зависимость вероятности совпадения слабых мест W (или значений электрической прочности) от площади S.

Экспериментальная зависимость $E_{пр}(S)$ хорошо соответствует формуле

$$E_{пр} = A - B\lg S, \qquad (8.13)$$

где A и B — постоянные.

Как показывает (8.13), с увеличением S уменьшается $E_{пр}$, что связано с увеличением вероятности совпадения слабых мест и что, в свою очередь, повышает вероятность пробоя при неизменном напряжении. Распределение $E_{пр}$ для данного диэлектрика в большинстве случаев описывается нормальным законом.

Экспериментальное определение электрической прочности обычно производится на образцах ограниченной площади, много меньшей площади реальных секций. С помощью статистических закономерностей результаты, полученные на образцах с одной площадью, могут быть распространены на

образцы с другой площадью. Функция распределения пробивных напряжений $F_1(U_{пр})$ (вероятность пробоя при напряжении не более $U_{пр}$) образца с площадью S связана с функцией распределения пробивных напряжений $F_m(U_{пр})$ образца с площадью mS соотношением

$$F_m(U_{пр}) = 1 - [1 - F_1(U_{пр})]^m. \qquad (8.14)$$

Обозначим $U_{ср}$ среднее пробивное напряжение образцов площадью S, $U_{m\,ср}$ то же для образцов площадью $S_m = mS$, σ и σ_m соответственно среднеквадратичные отклонения. Эти параметры связаны соотношением

$$U_{ср} = U_{m\,ср} = a\sigma; \qquad (8.15а)$$

$$\sigma_m = b\sigma, \qquad (8.15б)$$

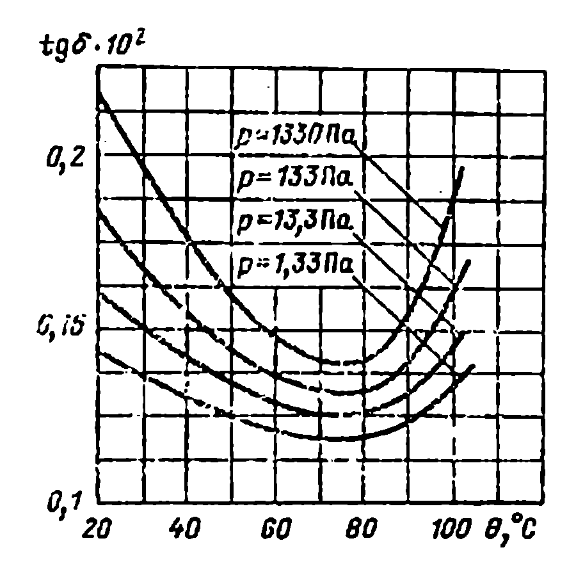
где a и b — есть функции m, значения которых приводятся ниже.

m	1	10	10^2	10^3	10^4
a	0	1,54	2,5	3,25	3,85
b	1	0,59	0,43	0,35	0,3

Как следует из (8.15а), (8.15б) и вышеприведенных данных, с ростом площади S уменьшается не только среднее пробивное напряжение, но и σ_m. В реальной изоляции соотношение между толщинами твердой и жидкой фаз таково, что пробой имеет последовательный характер во всем диапазоне применяемых толщин диэлектрика, за исключением пропитанной бумажной изоляции с количеством слоев два и менее. При изменении коэффициента запрессовки k изменяется общая толщина диэлектрика за счет изменения толщины слоя пропитывающей жидкости при неизменной толщине твердой фазы. Но поскольку $E_{пр}$ пропитанной изоляции определяется главным образом прочностью твердой фазы, то значение $U_{пр}$ остается практически неизменным. Поэтому и при изменении k для оценки электрической прочности конденсаторного диэлектрика пользуются значением $E_{пр} = U_{пр}/d_c$.

8.4. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРА

Составляющие диэлектрик материалы в ходе изготовления конденсатора подготавливаются для длительной работы при высоких электрических и тепловых нагрузках, и технологический цикл может значительно влиять на характеристики конденсатора, так как даже незначительное загрязнение и увлажнение диэлектрика, а также наличие незначительных количеств растворенного в нем газа ухудшают свойства конденсатора. Наиболее продолжительным и ответственным является процесс термовакуумной обработки, включающий в себя



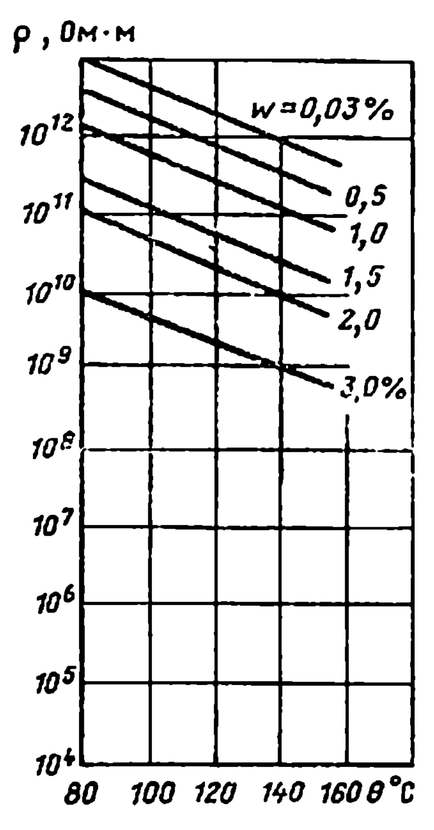
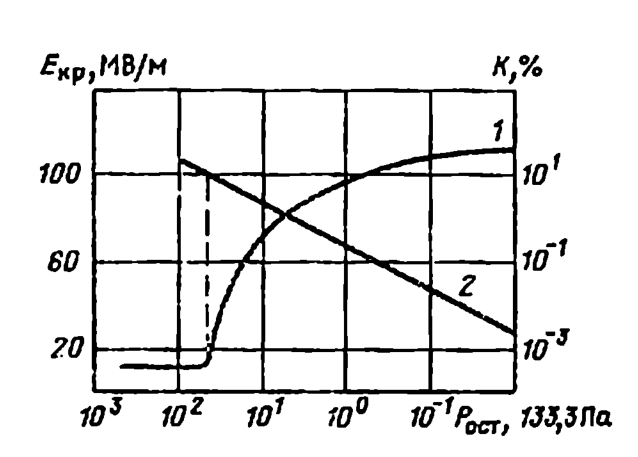


Рис. 8.5. Зависимость tgδ бумажного диэлектрика от температуры при различных остаточных давлениях при сушке

Рис. 8.6. Зависимость удельного объемного сопротивления бумаги КОН-2 от температуры, при различной влажности

сушку и обезгаживание твердого диэлектрика, сушку, очистку и обезгаживание пропитывающей жидкости и последующую пропитку твердого диэлектрика. Влияние остаточной влажности на tgδ бумажного диэлектрика показано на рис. 8.5, из которого видно, что с ее увеличением увеличивается абсолютное значение tgδ, а его температурная зависимость приближается к U-образной форме. С увеличением влажности уменьшается удельное объемное сопротивление ρ_v, что иллюстрируется рис. 8.6, где показана зависимость ρ_v от влажности для бумаги марки КОН-2. Аналогичная зависимость наблюдается и для кабельных бумаг. Остаточное давление $p_{ост}$ при пропитке оказывает значительное влияние и на характеристики частичных разрядов (ЧР). На рис. 8.7 приведены зависимости напряженности $E_{кр}$ возникновения критических ЧР в бумажно-масляном диэлектрике (кривая *1*) и содержания воздуха в процентах по объему в нефтяном масле от $p_{ост}$ в процессе сушки и пропитки. Из него видно, что при $p_{ост}<10$ Па зависимость $E_{кр}=f(p_{ост})$ очень мала. При $p_{ост}>10$ Па значение $E_{кр}$ заметно снижается, а при $p_{ост}>10^4$ Па в диэлектрике образуются газовые пузыри. На рис. 8.8 показана зависимость напряженности возникновения начальных (кривая *1*) и критических (кривая *2*) ЧР от влажности бумажного диэлектрика, пропитанного нефтяным маслом (сплошная линия) и трихлордифенилом (пунктир). При пропитке бумажного диэлектрика нефтяным



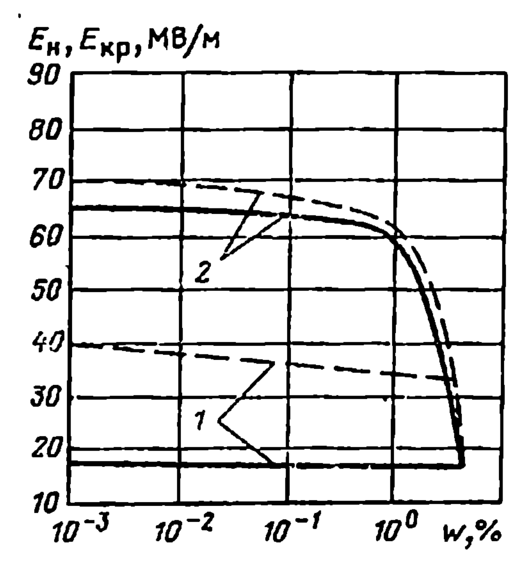


Рис. 8.7. Зависимость $E_{кр}$ бумажно-масляного диэлектрика (*1*) и содержания воздуха *K* (*2*) от остаточного давления при пропитке

Рис. 8.8. Зависимость напряженности возникновения начальных $E_н$ (*1*) и критических $E_{кр}$ (*2*) частичных разрядов от влажности бумаги *w* (в процентах по массе), пропитанной нефтяным маслом (сплошные линии) и трихлордифенилом (пунктир)

маслом при $p_{ост} < 10^4$ Па в нем не наблюдается заметной зависимости напряженности возникновения начальных ЧР от влажности (при интенсивности на уровне 10^{-14} Кл). Для бумажного диэлектрика, пропитанного трихлордифенилом, такая зависимость наблюдается вполне отчетливо. В области влажности бумаг от 0,5 до 7% (по массе) напряженность возникновения критических ЧР в бумажном диэлектрике как при пропитке нефтяным маслом, так и трихлордифенилом сильно снижается с увеличением влажности. В области влажности от 10^{-3} до 0,5% это снижение выражено менее резко.

Глава девятая

ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В КОНДЕНСАТОРЕ

9.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Частичные разряды (ЧР) в силовых конденсаторах являются одним из основных факторов, разрушающих электрическую изоляцию при работе на переменном и импульсном напряжениях.

ЧР представляет собой электрический разряд, частично шунтирующий изоляцию между электродами [9.1—9.3]. Эти разряды могут возникать в ограниченной области диэлектрика с пониженной электрической прочностью или повышенной напряженностью электрического поля как в прилегающих, так и в не прилегающих к обкладке объемах изоляции. Область диэлектрика, в которой возникает ЧР, обычно называется включением; примерами таких включений могут быть газовое включение, прослойка пропитывающей жидкости между листами твердого диэлектрика или между листом и обкладкой.

Под воздействием ЧР происходит постепенное разрушение диэлектрика, причем характер и степень разрушения зависят от интенсивности ЧР, от свойств и вида изоляции. Разрушения связаны с разрывом молекулярных связей и образованием радикалов; возможен и обратный процесс: укрупнение молекул или присоединение радикалов. Эти явления связаны с выделением водорода или других газов: метана, ацетилена, углекислого газа и др.; возможно образование углеродистых соединений.

В изоляции конденсаторов наиболее интенсивно разрушается жидкий диэлектрик, что проявляется в изменении физико-химических характеристик, сопровождается выделением газа, увеличением $\operatorname{tg}\delta$ и проводимости. В последующем возникают разрушения твердой фазы, которые при интенсивном протекании завершаются пробоем изоляции.

Наиболее опасными являются газообразные продукты. При скорости газообразования, превосходящей скорость поглощения газов окружающей жидкостью за счет возможного химического связывания и растворения, а также при насыщении жидкости газом, в конденсаторном диэлектрике может образовываться концентрированная газовая фаза в виде газовых включений. Напряженность поля в таком включении, имеющем $\varepsilon_r = 1$, будет наибольшей по сравнению с другими компонентами диэлектрика, и интенсивность ЧР в нем значительно возрастает, что ускоряет разрушение изоляции в этой точке за счет эрозии твердой фазы. Таким образом, возникновение и развитие ЧР в конденсаторном диэлектрике во многом определяются напряженностью поля в жидком диэлектрике и свойствами пропитывающей жидкости.

В начале развития конденсаторостроения, когда технология термовакуумной обработки диэлектрика и пропитывающей жидкости была далеко не совершенна, в диэлектрике могли образовываться газовые включения — пузырьки — из остаточных растворенных газов, являвшиеся источником возникновения и развития ЧР.

В конденсаторах, пропитанных жидким диэлектриком, при современной технологии изготовления изоляция не содержит

газовых включений. В этом случае ЧР возникают прежде всего в прослойках жидкого диэлектрика, так как электрическая прочность жидкости значительно меньше, чем прочность твердой изоляции (конденсаторной бумаги или полимерной пленки).

Наименьшее значение напряженности поля во включении $E_{в.з}$, приводящее к пробою включения, называется напряженностью возникновения или зажигания ЧР. При пробое включения, емкость которого обозначим через $C_в$, ионы, образующиеся в процессе разряда, заряжают поверхность включения и создают поле, обратное по направлению основному (внешнему) полю. Как правило, плотность тока разряда, возникающего после пробоя емкости $C_в$, недостаточна для его поддержания, и он гаснет. Наибольшее значение напряженности $E_{в.п}<E_{в.з}$, при которой возникший разряд прекращается или гаснет, называется напряженностью погасания ЧР. Она лежит в пределах от 10 до 90% напряженности зажигания.

Эквивалентная схема конденсаторного диэлектрика с «плоским» включением, расположенным перпендикулярно силовым линиям поля, показана на рис. 9.1. Общая емкость C_x составляется из трех емкостей: емкости включения $C_в$, емкости $C_д$, включенной последовательно с $C_в$, и емкости C_a, образуемой оставшейся частью диэлектрика, в которой предполагается отсутствие включений:

$$C_x = C_a + C_в C_д/(C_в + C_д). \qquad (9.1)$$

Используем обозначения рис. 9.1 для напряженности поля во включении:

$$E_в = \frac{E}{\varepsilon_{rв}/\varepsilon_{rд} + d_в(\varepsilon_{rд} - \varepsilon_{rв})/d\varepsilon_{rд}}, \qquad (9.2)$$

где $\varepsilon_{rд}$ — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $\varepsilon_{rв}$ — то же включения; $E = U/d$ — расчетная напряженность поля в диэлектрике; U — приложенное напряжение.

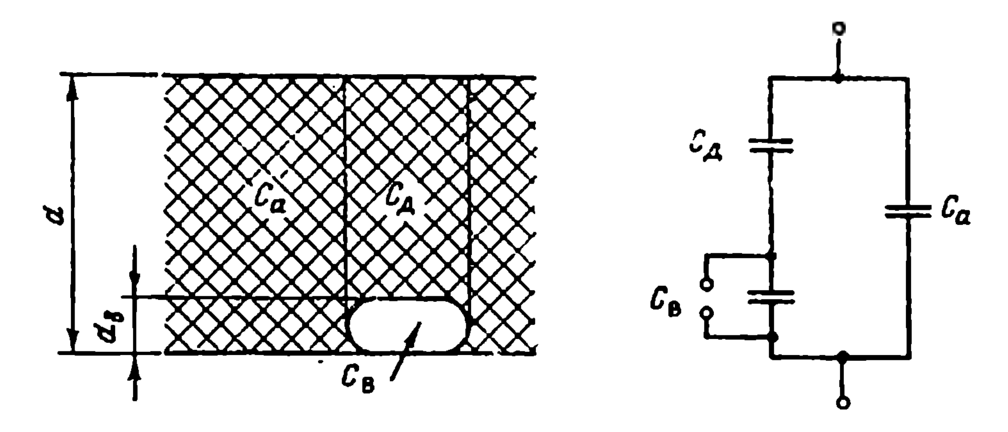


Рис. 9.1. Схема замещения диэлектрика при ЧР

Обозначим через $U_{ч.р}$ приложенное к обкладкам конденсатора напряжение, при котором во включении возникает ЧР. Связь между $U_{ч.р}$ и напряжением на включении $U_{в.з}$, соответствующем возникновению ЧР, находится из эквивалентной схемы рис. 9.1:

$$U_{ч.р}=U_{в.з}(C_в+C_д)/C_д. \tag{9.3}$$

При пробое включения (возникновении ЧР) через него пройдет заряд q, и напряжение на включении изменится на $\Delta U_в=U_{в.з}=U_{в.п}$, где $U_{в.з}$ — напряжение зажигания и $U_{в.п}$ — напряжение погасания ЧР.

Учитывая, что емкости $C_в$ и $C_д$ намного меньше емкости C_a, находим заряд, проходящий через включение:

$$q=(C_в+C_д)(U_{в.з}-U_{в.п})=(C_в+C_д)\Delta U_в, \tag{9.4}$$

который обусловлен процессами в диэлектрике и практически не может быть измерен.

Изменение напряжения на обкладках ΔU_x можно выразить через изменение некоторого фиктивного заряда $q_{ч.р}$, называемого кажущимся зарядом ЧР, в вид

$$\Delta U_x=q_{ч.р}/C_x. \tag{9.5}$$

Если кажущийся заряд $q_{чр}$ мгновенно внести между обкладками, то он вызовет такое же изменение напряжения на них, как и реальный ЧР. Практически значения $q_{чр}$ невелики (порядка 10^{-12} Кл и менее), и вызываемые ими изменения напряжения на обкладках конденсатора незначительны. При $q_{чр}=10^{-12}$ Кл и $C_x=1000$ пФ $\Delta U_x=10^{-3}$ В. С увеличением C_x значение ΔU_x уменьшается. Напряжение на обкладках конденсатора в дальнейшем восстанавливается за счет подтекания зарядов от источника напряжения и других емкостей. Это приводит к возникновению высокочастотных колебаний в схеме, регистрация которых специальными измерительными устройствами позволяет исследовать характеристики ЧР.

Связь между $q_{чр}$ и q находится из следующих соображений. После возникновения ЧР и уменьшения напряжения на емкости $C_в$ на $\Delta U_в$ из емкости C_a ушел заряд на подзарядку емкости $C_д$, равный кажущемуся заряду ЧР $q_{чр}$ и вызвавший уменьшение напряжения на ΔU_x, т. е.

$$q_{чр}=\Delta U_x C_x=\Delta U_в C_д. \tag{9.6}$$

Определяя из (9.4) $\Delta U_в$ и подставляя его в (9.6), получаем

$$q_{чр}=qC_д/(C_в+C_д). \tag{9.7}$$

Кажущийся заряд $q_{чр}$ характеризует интенсивность единичного ЧР. Для оценки интенсивности ЧР за интервал времени, значительно больший времени между двумя единичными ЧР, используются частота следования ЧР $n_{чр}$, средний ток $I_{чр}$,

средняя мощность $P_{чр}$ и квадратичный параметр $D_{чр}$. Частота следования представляет среднее число импульсов ЧР в единицу времени. Средний ток $I_{чр}$ представляет сумму абсолютных значений $q_{чр}$ за время t, деленную на этот интервал времени. Если все заряды одинаковы, то

$$I_{чр}=n_{чр}q_{чр}. \qquad (9.8)$$

Средняя мощность $P_{чр}$ представляет среднее значение мощности, подводимой к конденсатору для компенсации мощности, выделяемой в нем во время ЧР. Квадратичный параметр представляет сумму квадратов $q_{чр}$ за время t, деленную на этот интервал времени.

Выделяемая при ЧР энергия расходуется частично на нагревание диэлектрика, частично на его разрушение. При условии, что $C_a \gg C_д$, энергия единичного разряда может быть определена как разность начальной $W_з$ и конечной $W_п$ энергий, запасаемых в емкостях эквивалентной схемы рис. 9.1:

$$W_{ч.р}=W_з-W_п=\frac{C_д+C_в}{2}\left(U^2_{п.з}-U^2_{в.п}\right). \qquad (9.9)$$

При $U_{п.з} \approx U_{в.п}$ с учетом (9.3) и (9.4) получим

$$W_{чр}=q_{чр}U_{чр}. \qquad (9.10)$$

При $U_{в.п} \ll U_{п.з}$

$$W_{чр}=q_{чр}U_{чр}/2. \qquad (9.10а)$$

Если все ЧР имеют одинаковую энергию, то мощность ЧР равна:

$$P_{чр}=n_{чр}W_{чр}=n_{чр}\frac{C_д+C_в}{2}\left(U^2_{в.з}-U^2_{в.п}\right). \qquad (9.11)$$

При постепенном подъеме напряжения на конденсаторе интенсивность ЧР в его диэлектрике изменяется. Вначале, когда напряжение на конденсаторе сравнительно невелико, в нем появляются ЧР слабой интенсивности — порядка 10^{-14}—10^{-12} Кл, называемые начальными ЧР. При длительном воздействии такого напряжения начальные ЧР могут на некоторое время исчезать, затем появляются вновь. Длительное существование начальных ЧР вызывает медленное разрушение диэлектрика, рост $\operatorname{tg}\delta$ и определяет ресурс конденсатора. При дальнейшем подъеме напряжения интенсивность ЧР резко возрастает до 10^{-10}—10^{-9} Кл, и диэлектрик начинает быстро (в течение дней или часов) разрушаться. Такие ЧР называются критическими. Наименьшее напряжение $U_н$, при котором появляются начальные ЧР, называется напряжением начальных ЧР. Наименьшее напряжение $U_{кр}$, при котором появляются критические ЧР, называется напряжением критических ЧР.

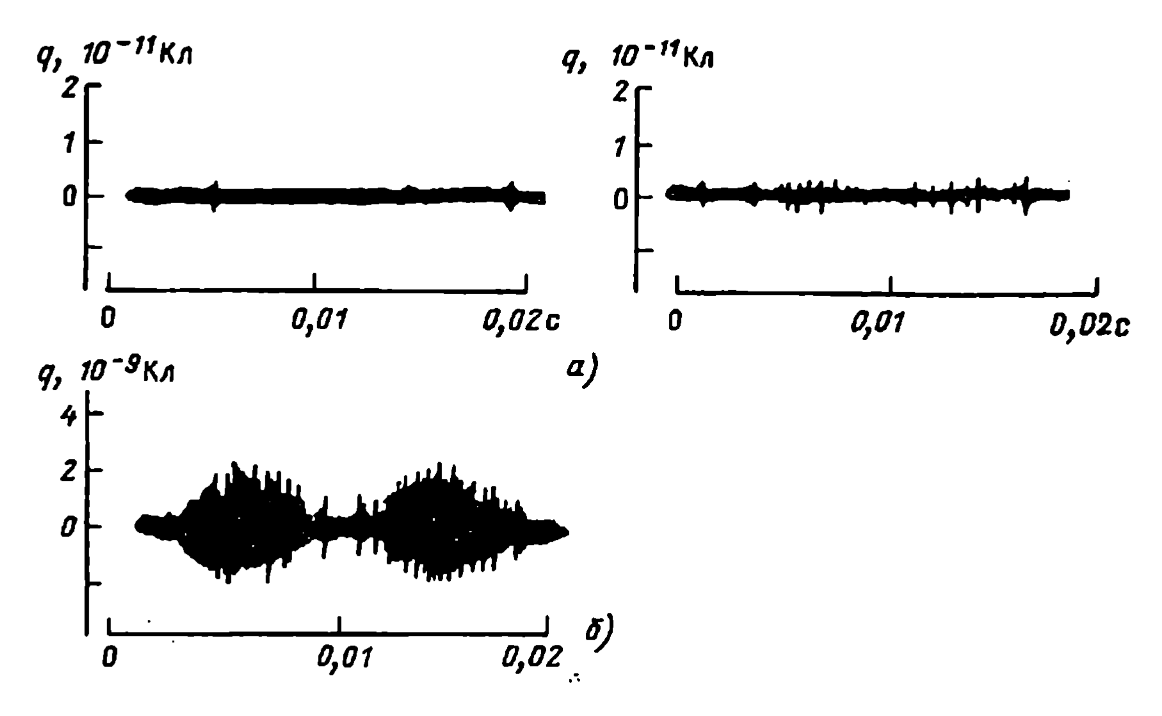


Рис. 9.2. Характерные осциллограммы ЧР при переменном напряжении: *а* — начальные ЧР; *б* — критические ЧР

Характерные осциллограммы начальных и критических ЧР приведены на рис. 9.2.

9.2. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ НА ПЕРЕМЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Если к конденсатору, в диэлектрике которого содержится включение (см. рис. 9.1), прикладывается синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, то амплитуда напряжения на включении

$$U_{\text{п}m} = U_m \frac{C_\text{д}}{C_\text{д} + C_\text{в}} = U\eta, \tag{9.12}$$

где

$$\eta = C_\text{д} / (C_\text{д} + C_\text{в}). \tag{9.13}$$

Такой же зависимостью связаны с соответствующими значениями приложенного напряжения и другие напряжения на включении: зажигания ЧР, их погасания и т. д. Напряжение на включении до возникновения ЧР изменяется по тому же закону, что и приложенное к конденсатору, т. е. $u_\text{в} = U_{\text{п}m} \sin \omega t$. По достижении напряжения зажигания ЧР $U_{\text{п.з}}$, что соответствует значению приложенного к конденсатору напряжения $U_\text{з} = U_{\text{п.з}}/\eta$, в нем возникает разряд и напряжение на включении падает до значения напряжения погасания $U_{\text{п.п}}$, что соответствует значению приложенного напряжения $U_\text{п} = U_{\text{в.п}}/\eta$ (рис. 9.3). После того как разряд во включении погас, напряже-

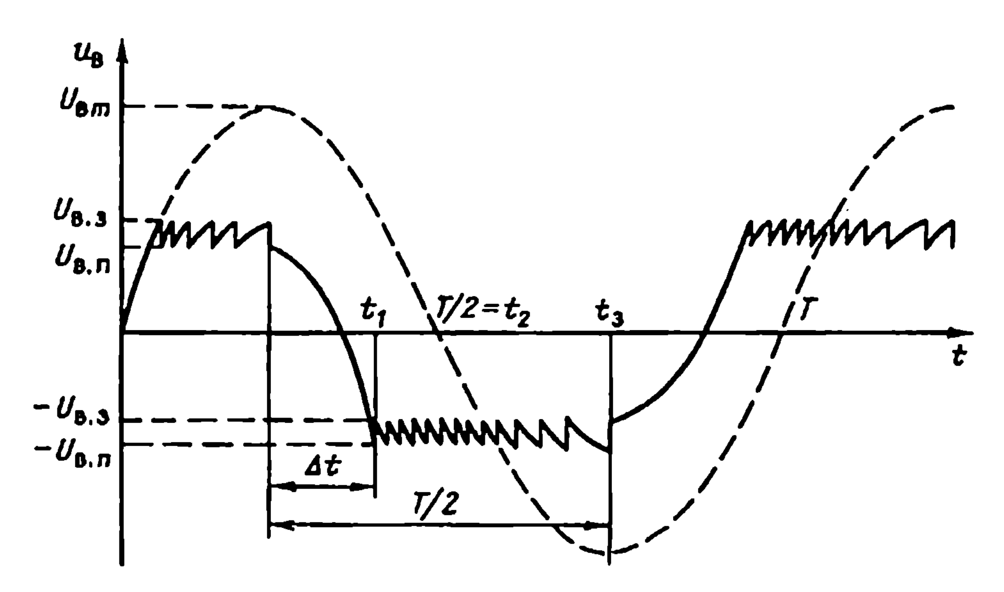


Рис. 9.3. Развитие во времени ЧР при синусоидальном напряжении

ние на нем снова начинает расти по закону изменения приложенного напряжения до значения $U_{в.з}$, после чего наступает повторный разряд, и напряжение на включении снова падает до $U_{в.п}$ и т. д. Время, через которое происходит повторение разрядов, определяется изменением напряжения на включении на $\Delta U_в = U_{в.з} - U_{в.п}$, чему соответствует изменение приложенного напряжения $\Delta U = \Delta U_в / \eta$. При прохождении приложенного напряжения через максимум, напряжение на включении находится между $U_{в.з}$ и $U_{в.п}$. После прохождения максимума напряжение на включении уменьшается до нуля в соответствии с законом изменения приложенного напряжения и далее снова возрастает до $-U_{в.з}$, и весь процесс повторяется, как и при положительном полупериоде. Пробивное напряжение включения можно принять одинаковым для обоих полярностей.

Изменение напряжения на включении после перехода через максимум до возникновения последующих ЧР составляет $U_{в.з} + U_{п.п}$, чему соответствует изменение приложенного напряжения

$$\Delta U_1 = (U_{в.з} + U_{в.п})/\eta. \qquad (9.14)$$

Найдем число ЧР в одном включении за один полупериод:

$$m_{чр} = \frac{2U_{вm} - (U_{в.з} + U_{в.п})}{U_{в.з} - U_{в.п}} + 1 = \frac{2(U_{вm} - U_{в.п})}{U_{в.з} - U_{в.п}}. \qquad (9.15)$$

Из (9.15) следует, что $m_{чр}$ зависит от соотношения между $U_{в.з}$ и $U_{в.п}$ или, что то же самое, между $U_з$ и $U_п$. Число ЧР во включении за 1 с

$$n_{чр} = 2 f m_{чр}, \qquad (9.16)$$

где f — частота приложенного напряжения.

Мощность, выделяемая в одном включении при ЧР, находится подстановкой значения $n_{чр}$ из (9.16) в (9.11). После преобразований находим

$$P_{чр}=2f(C_д+C_в)(U_{нm}-U_{з.н})(U_{в.з}+U_{н.п}). \qquad (9.17)$$

Мощность в единичном включении, выделяемая при ЧР,

$$P_{чр}=\frac{2}{T}\sum_{i=1}^{m_{чр}} q_{чрi}u_i, \qquad (9.18)$$

где u_i — мгновенное значение напряжения на диэлектрике в момент времени разряда с кажущимся зарядом $q_{чрi}$; T — период приложенного напряжения.

При пользовании формулой (9.18) необходимо учитывать знаки при $q_{чрi}$ и u_i.

При повышении прикладываемого напряжения разброс напряжения зажигания ЧР во включении, а также увеличение числа мест возникновения ЧР (включений) имеют стохастическую природу и подчинены статистическим закономерностям. Для их описания может быть использован нормальный закон распределения. Учет этих обстоятельств приводит к существенно отличным от формулы (9.17) зависимостям мощности ЧР напряжения или напряженности, имеющим вид

$$P_{чр}=A_1U^a=A_2E^a, \qquad (9.19)$$

где показатель степени a находится в пределах от 4 до 8, а в среднем $a\approx6$ и $A=\mathrm{const}$.

Зависимости, аналогичные (9.19), получены экспериментально [9.4]. Характерные зависимости $I_{чр}$ и $n_{чр}$ от напряжения приведены на рис. 9.4.

В диэлектрике, пропитывающая жидкость которого выделяет значительное количество газообразных продуктов при разложении в электрическом поле, как, например, нефтяное масло, в результате действия ЧР могут образовываться концентрированные газовые включения (газовые пузырьки), вследствие чего напряжение возникновения ЧР резко снижается.

Рассмотрим особенности развития ЧР в изоляции, пропитанной нефтяным конденсаторным маслом. При наличии ЧР в изоляции возникает разложение жидкого диэлектрика с образованием газообразных продуктов. Одновременно происходит непрерывное поглощение образующихся газов как за счет растворения газа в жидком диэлектрике, так и за счет химического связывания газа (в основном водорода). Последнее наиболее сильно сказывается в жидкостях, в составе которых имеются непредельные углеводороды. Когда интенсивность газовыделения (газовыделение в единицу времени) превосходит интенсивность поглощения газов, возникают условия для образования газовых пузырьков. Вследствие пробоев, проис-

Рис. 9.4. Зависимость $n_{чр}$ и тока ЧР $I_{чр}$ от напряжения на образце толщиной 80 мкм

ходящих в этих пузырьках, происходит резкое возрастание интенсивности ЧР на 2—3 порядка (возникновение критических ЧР), что приводит к дальнейшему росту этих пузырьков и существенному понижению напряжения возникновения ЧР [9.5].

Предельная растворимость газа в жидком диэлектрике (см. § 6.2)

$$C_г = V_г / V_ж, \qquad (9.20)$$

где $V_г$ — объем газа, приведенный к нормальным условиям; $V_ж$ — объем жидкого диэлектрика. Предельная растворимость различных газов в нефтяном масле приведена в § 6.4.

Количество газа, растворенного в единицу времени, может быть определено из (6.8):

$$v_t = \frac{dV}{dt} = \beta(V_0 - V_t), \qquad (9.21)$$

где V_0 — максимальное количество газов, которое может быть поглощено данным объемом жидкого диэлектрика; V_t — количество газов, уже поглощенных к моменту времени t; β — коэффициент, характеризующий скорость газопоглощения.

Например, для водорода в нефтяном масле

$$V_0 = C_г V_ж = 0{,}04 V_ж \frac{p}{10^5}, \qquad (9.22)$$

где p — давление окружающей среды, Па.

Количество газов, выделяемое в секунду в процессе развития ЧР, пропорционально мощности ЧР:

$$v_{чр} = B P_{чр}, \qquad (9.23)$$

где B — удельное количество газов, выделяющихся при разложении жидкого диэлектрика ЧР с энергией 1 Дж.

Критические ЧР возникают при условии

$$v_{чр} \geqslant v_t. \qquad (9.24)$$

В области критических ЧР количество поглощенных газов определяется только растворяющей способностью жидкого диэлектрика:

$$V_t = \int_0^t v_t dt = V_0 (1 - e^{-\beta t}) \qquad (9.25)$$

и

$$v_t=\beta V_0 e^{-\beta t}. \qquad (9.26)$$

В режиме критических ЧР в бумажно-масляной изоляции снижение напряжения ЧР до минимального значения происходит за время, исчисляемое долями секунд или секундами. При таких временах

$$e^{-\beta t}\approx 1 \quad \text{и} \quad v_t\approx\beta V_0, \qquad (9.27)$$

при этом условие возникновения критических ЧР имеет вид

$$v_{чр}\geqslant\beta V_0. \qquad (9.28)$$

В области начальных ЧР все выделяющиеся при ЧР газы поглощаются маслом, т. е.

$$V_t=v_{чр}t \quad \text{и} \quad v_t=\beta(V_0-v_{чр}t). \qquad (9.29)$$

Из последнего выражения следует, что в режиме начальных ЧР в герметичном объеме имеет место непрерывное уменьшение величины v_t. Поэтому должен наступить момент, когда будет выполнено условие (9.24), и режим начальных ЧР перейдет в режим критических. Время, необходимое для такого перехода $t_{кр}$, находится из совместного решения (9.24) и (9.29):

$$v_{чр}=\beta(V_0-v_{чр}t_{кр}),$$

откуда

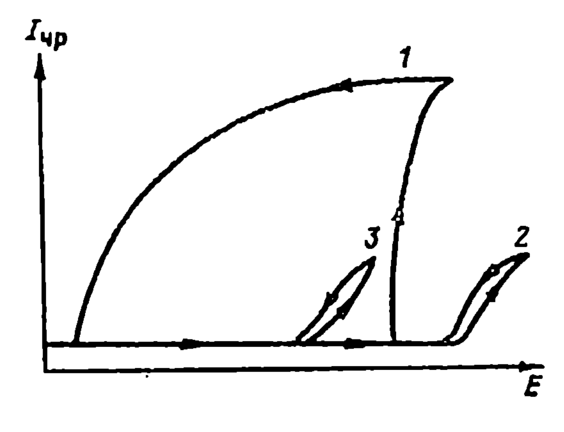
$$t_{кр}=(\beta V_0-v_{чр})/\beta v_{чр}. \qquad (9.30)$$

Если после снижения напряжения критические ЧР в процессе дальнейшей работы не имеют места или изоляция не находится под напряжением, то образовавшиеся газовые включения растворяются в масле и напряжение ЧР увеличивается.

Изложенный характер и закономерности протекания ЧР относятся к бумажно-масляной изоляции. При пропитке бумажного конденсаторного диэлектрика газостойкими жидкостями, например хлордифенилами или их заменителями, характер развития и протекания процессов имеет некоторые особенности. Эти жидкости при разложении под воздействием ЧР не выделяют такого количества газов, как это имеет место при пропитке нефтяным маслом, благодаря чему напряжение возникновения ЧР не снижается. Однако под воздействием ЧР эти жидкости могут разлагаться; например, из хлордифенилов выделяется углерод в виде сажи, углеродные соединения и хлористый водород, что приводит к увеличению $\operatorname{tg}\delta$ и способствует разрушению твердого диэлектрика. В целом, однако, рост интенсивности ЧР и разрушение твердой фазы конденсаторного диэлектрика с пропиткой газостойкими жидкостями происходят значительно медленнее, чем диэлектрика с пропиткой нефтяным маслом. Если диэлектрик, пропитанный

Рис. 9.5. Характерные зависимости тока ЧР $I_{чр}$ от напряженности электрического поля E при подъеме и снижении напряжения:

1 — пропитка нефтяным маслом; 2 — пропитка трихлордифенилом, $\Theta=80°$ С; 3 — пропитка трихлордифенилом, $\Theta=20°$ С



этими жидкостями, довести до возникновения в нем критических ЧР и оставить его при этом напряжении, то через некоторое время ЧР прекратятся. Причина этого заключается в том, что выделяющийся при разложении жидкостей углерод шунтирует очаг ЧР и гасит ЧР, чему благоприятствуют также малое газовыделение и большая газопоглощающая способность этих жидкостей. Для того чтобы вновь вызвать появление критических ЧР, нужно повысить напряжение против прежнего уровня, при этом процесс снова пойдет так, как описано выше.

Затухание ЧР особенно заметно при вязкости жидкости ниже $5\cdot10^{-3}$ м²/с. На рис. 9.5 [9.6] приведены зависимости тока ЧР конденсаторов, пропитанных различными жидкостями, от напряженности электрического поля при разных температурах. Как видно из этого рисунка, с повышением температуры (снижением вязкости) затухание ЧР происходит при меньшем снижении напряженности, т. е. быстрее. При кинематической вязкости жидкостей ниже $5\cdot10^{-3}$ м²/с неоднократные, быстро следующие друг за другом повышения напряжения до значения возникновения ЧР не приводят к снижению напряженности ЧР. Опыты показали, что конденсаторы, пропитанные газостойкими жидкостями, работают без выхода из строя более 10^3 ч при напряженности критических ЧР, тогда как конденсаторы с пропиткой нефтяным маслом в таком режиме работают не более 1—6 ч.

9.3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Зависимость напряженности ЧР от толщин диэлектрика и фольги. В изоляции секций конденсаторов ЧР возникают в местах с наибольшей напряженностью электрического поля, что в большинстве случаев соответствует области на краю (на острых кромках) фольги, вблизи токопроводящих включений в конденсаторной бумаге, в местах расположения вкладных выводов, в складках, возникающих при намотке секций.

В большинстве случаев ЧР возникают на краю фольги. В этом случае максимальная напряженность вблизи острой кромки определяется так: в случае бесконечно тонких обкладок (рис. 2.1) — формулами (2.34) или (1) табл. 2.1; в случае обкладок с толщиной, соизмеримой с толщиной диэлектрика секции и со скрытой фольгой (рис. 2.3, *а*) — формулой (9) табл. 2.1 и в случае расположения обкладок (рис. 2.3, *б*) — формулой (8) табл. 2.1.

Используя указанные формулы, можно принять, что ЧР возникают при условии, что напряженность электрического поля вблизи кромки фольги на расстоянии ρ от края фольги ($\rho \ll d_c$) достигнет значения $\rho_{\rho 0}$, при котором возникает пробой окружащей среды (пробой жидкого и газообразного диэлектрика вблизи острой кромки), т. е. при условии

$$E_{z\rho} = E_{\rho 0}. \tag{9.31}$$

Тогда в случае бесконечно тонких обкладок по рис. 2.1 на основании (2.34) или (1) табл. 2.1

$$U_{чр} = A_1 \sqrt{d_c} \tag{9.32}$$

$$E_{чр} = A_1 d_c^{-0,5}, \tag{9.33}$$

где

$$A_1 = E_{\rho 0} \sqrt{4\pi\rho}.$$

Соответственно для случая расположения обкладок по рис. 2.4, *а* при $\lambda \to \infty$ на основании (2.35), (2.37) или (2) табл. 2.1 имеем для зависимости $E_{чр}$ от d_c также формулу (9.32), в которой

$$A_1 = E_{\rho 0} \sqrt{2\pi\rho}.$$

В случае учета толщины обкладки $d_ф$ и расположения обкладок по рис. 2.3, *а* на основании (9) табл. 2.1

$$U_{чр} = A_2 d_c^{2/3} \sqrt[3]{a_2} \tag{9.34}$$

и

$$E_{чр} = A_2 d_c^{-1/3} \sqrt[3]{a_2}, \tag{9.35}$$

где $A_2 = E_{\rho 0} \sqrt[3]{3\pi\rho}$ и $a_2 = \sqrt{1 - \dfrac{1}{(1 + d_ф/d_c)^2}}$.

В случае расположения обкладок по рис. 2.3, *б* на основании (8) табл. 2.1

$$U_{чр} = A_2 d_c^{2/3} \sqrt[3]{\frac{a_3}{a_3 - 1}} \tag{9.36}$$

и

$$E_{чр}=A_2 d_c^{-1/3}\sqrt[3]{\frac{a_3}{a_3-1}},\qquad (9.37)$$

где $a_3=\left[1+2\frac{d_ф}{d_c}+\sqrt{(1+2d_ф/d_c)^2-1}\right]^2$.

Следует, однако, отметить, что при определении $U_{чр}$ или $E_{чр}$ с учетом толщины фольги по формулам (9.34)—(9.37) необходимо учитывать, что значение $E_{р0}$, при котором возникает пробой среды вблизи острой кромки фольги, зависит от толщины фольги $d_ф$ — уменьшается с возрастанием $d_ф$. Это приводит к тому, что изменение напряжения и напряженности ЧР с увеличением толщины фольги происходит сложнее, чем по указанным выше формулам.

Учет различия в диэлектрических проницаемостях среды [например, жидкого диэлектрика ε_{r2} и твердого диэлектрика ε_{r1} (см. рис. 2.7)] на основании (2.39) или (6) табл. 2.1 приводит к зависимостям $U_{чр}$ и $E_{чр}$ от d_c, аналогичным (9.32) и (9.33), в которых при $\lambda\to\infty$

$$A_1=E_{р0}\sqrt{2\pi\rho}\sqrt{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)/2\varepsilon_1}.\qquad (9.38)$$

Для конфигурации обкладок, показанных на рис. 2.8, на основании (2.41) имеем

$$U_{чр}=A_3 d^{1/(2-\alpha)};\qquad (9.39а)$$

$$E_{чр}=A_3 d^{-(1-\alpha)/(2-\alpha)},\qquad (9.39б)$$

в которых $A_3=E_{р0}k(\alpha,\rho)$.

Формула (9.33) хорошо подтверждается экспериментально. На рис. 9.6 приведены зависимости напряженностей критических и начальных ЧР от толщины для различных видов диэлектрика. Эти зависимости могут быть представлены эмпирическими формулами, в которых показатель степени при d_c близок к $-1/2$. Зависимости средних значений напряженности начальных ЧР, МВ/м, с интенсивностью на уровне $3\cdot10^{-15}$—10^{-14} Кл от толщины диэлектрика образцов бумажной изоляции d_c, мм, пропитанной конденсаторным маслом [9.3], имеют вид

$$E_н=3{,}6d_c^{-0{,}5},\qquad (9.40а)$$

где $0{,}03\leqslant d_c\leqslant 1{,}0$ мм.

Разброс значений $E_н$ характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma_н/E_н\approx 10\%$.

Зависимости напряженности критических ЧР, МВ/м, от толщины диэлектрика d_c, мм, для секций конденсаторов с изоляцией из бумаги КОН-1, пропитанной конденсаторным маслом или трихлордифенилом, имеют вид

$$E_{кр}=9{,}5d_c^{-0{,}58}.\qquad (9.40б)$$

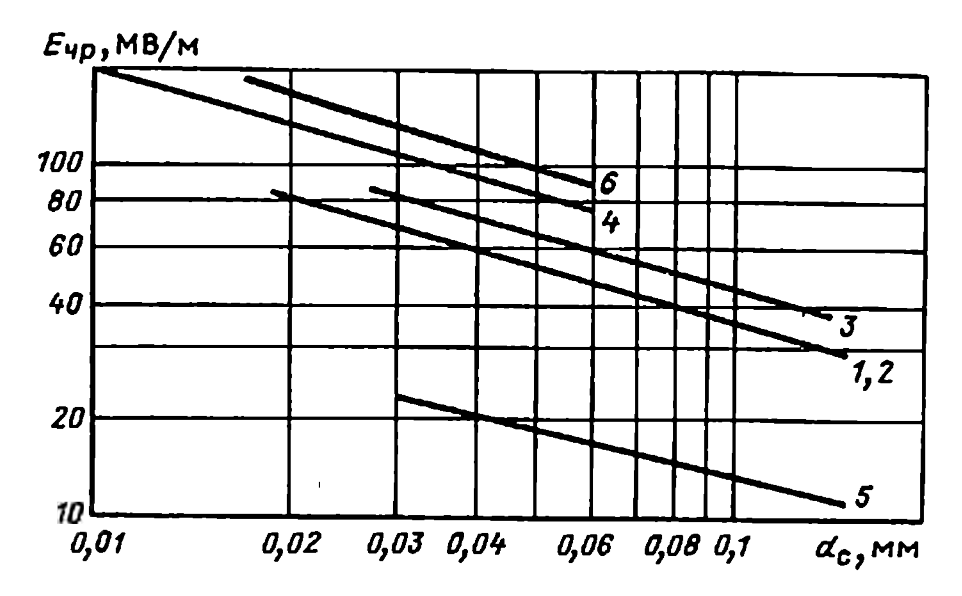


Рис. 9.6. Зависимости напряженности критических (*1—4, 6*) и начальных (*5*) ЧР от толщины диэлектрика:

1 и *5* — бумага КОН-1, пропитка конденсаторным маслом; *2* — бумага КОН-1, пропитка трихлордифенилом; *3* — бумажно-полипропиленовая изоляция, пропитка трихлордифенилом; *4* — бумажно-полипропиленовая изоляция и полипропиленовая пленка, пропитка фенилксилилэтаном; *6* — полипропиленовая пленка, загнутые края фольги, пропитка фенилксилилэтаном

Разброс напряженности критических ЧР для отдельных образцов характеризуется среднеквадратичным отклонением $\sigma_{кр}/E_{кр} \approx 7 \div 10\%$.

В многослойном диэлектрике силового конденсатора изменение количества слоев при одновременном изменении толщины слоя так, чтобы общая толщина диэлектрика оставалась неизменной, не изменяет значения $E_{чр}$. Постоянная A_1 в (9.33) определяется природой пропитывающей жидкости и зависит от температуры. Формула (9.33) показывает, что снижение $d_с$ — общей толщины диэлектрика — позволяет повысить $E_{чр}$ — напряженность возникновения ЧР, что, в свою очередь, позволяет повысить рабочую напряженность. Для этого нужно повысить электрическую прочность диэлектрика, что достигается применением пленки.

Напряженности критических ЧР для полипропиленово-бумажной (50%-ной пленки) изоляции на 30% выше, а для полипропиленовой изоляции на 50% выше, чем для бумажной изоляции [9.7]. Это объясняется, главным образом, уменьшением относительной диэлектрической проницаемости твердого диэлектрика ε_{r1}, так как в соответствии с (9.38) напряженность ЧР должна изменяться пропорционально $\sqrt{(\varepsilon_{r1}+\varepsilon_{r2})/\varepsilon_{r1}}$. Это также подтверждается данными работы [9.8], в которой получены зависимости напряженности критических ЧР от толщины диэлектрика для бумажного и пленочного (полипропилен) диэлектриков, пропитанных различными жидкостями,

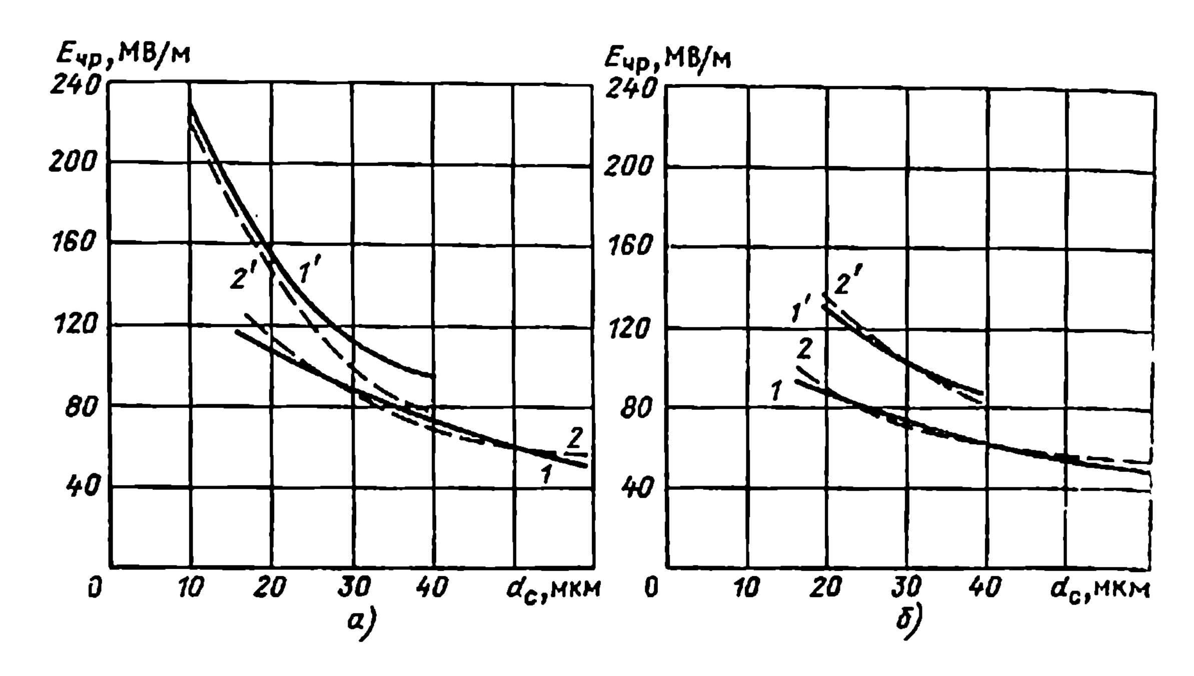


Рис. 9.7. Зависимость $E_{чр}$ от толщины диэлектрика, пропитанного конденсаторным маслом (*а*) и трихлордифенилом (*б*):

1 и *2* — для бумажного диэлектрика; *1'* и *2'* — для пленочного диэлектрика (полипропиленовая пленка); *1* и *1'* — опыт; *2* и *2'* — расчет по (9.41)

в области толщин 10—60 мкм. Полученные данные представлены на рис. 9.6 и 9.7.

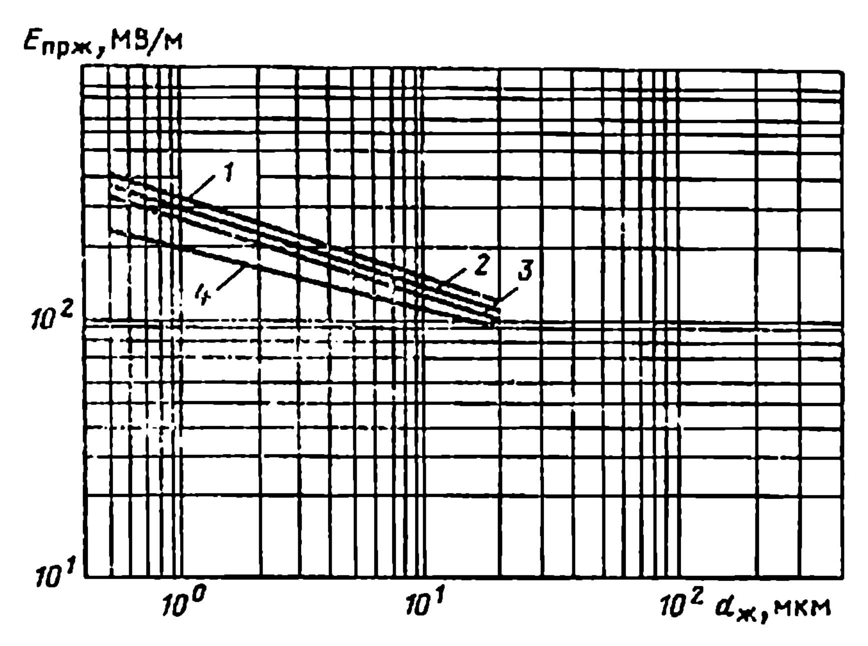
Авторы попытались связать полученные данные с результатами определения электрической прочности жидких диэлектриков $E_{пр\,ж} = E_{\rho 0}$ в тонких слоях (рис. 9.8). При этом напряженность критических ЧР может быть определена по формуле, которая по структуре аналогична (9.33), с учетом (9.38) при $\varepsilon_{r2} \gg \varepsilon_{r1}$:

$$E_{кр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}}} \sqrt{\frac{d_ф}{d_с}} E_{пр\,ж}. \qquad (9.41)$$

Как следует из рис. 9.7, значения $E_{кр}$, рассчитанные по (9.41), хорошо совпадают с экспериментальными.

Для пленочного диэлектрика на основе полипропиленовой пленки напряженности критических ЧР на 50% выше, чем для бумажного. Наиболее высокие значения $E_{кр}$ имеют место для полипропиленовой изоляции с пропиткой фенилксилилэтаном.

На рис. 9.9 приведена зависимость напряженности поля в прослойке трихлордифенила комбинированного бумажно-пленочного диэлектрика с трихлордифениловой пропиткой от процентного содержания полипропиленовой пленки в твердой фазе. Как следует из этого рисунка, с увеличением доли пленки, имеющей диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_{rп}$,



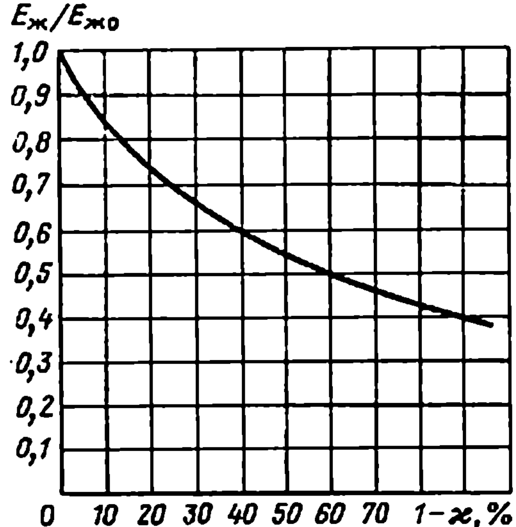


Рис. 9.8. Зависимость пробивной напряженности пропитывающего диэлектрика $E_{пр.ж}$ от расстояния между электродами $d_ж$; постоянное напряжение: 1 — конденсаторное масло; 2 — фенилксилилэтан; 3 — бензилисокапринат; 4 — трихлордифенил

Рис. 9.9. Зависимость напряженности в прослойке жидкого диэлектрика $E_ж/E_{ж0}$ от содержания пленки ϰ в бумажно-пленочном диэлектрике (полипропиленовая пленка, пропитка трихлордифенилом $E_{ж0}$ — при ϰ=0)

меньшую, чем у бумаги $\varepsilon_{rб}$, напряженность поля в жидкости уменьшается, что приводит к возрастанию напряжения и напряженности ЧР при одинаковых толщинах диэлектрика (см. рис. 9.6). Это объясняется изменением соотношения объемов компонентов, имеющих различные диэлектрические проницаемости, в объеме диэлектрика. Аналогичные кривые могут быть построены и для других пропитывающих жидкостей.

В [9.9] указывается, однако, что при прочих равных условиях преимущество имеет диэлектрик, в конструкции которого с обеих сторон обкладки расположена бумага, что ослабляет напряженность электрического поля у края фольги. Отсюда следует, что в бумажно-пленочном диэлектрике число слоев бумаги должно быть на один больше числа слоев пленки. Это, однако, одновременно приводит к некоторому снижению доли пленки при неизменной общей толщине

диэлектрика, что обычно сказывается сильнее на уменьшении напряженности ЧР.

Исследование влияния структуры комбинированной бумажно-пленочной изоляции на напряженность электрического поля у края обкладки, выполненное в [9.10], показало, что при пропитке изоляции неполярной жидкостью расположение у края обкладки диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью (бумаги) приводит к снижению напряженности у края обкладки. Степень снижения напряженности тем выше, чем меньше доля бумаги в общей толщине диэлектрика.

При пропитке полярной жидкостью наилучшая структура поля наблюдается для чисто пленочного диэлектрика с использованием неполярной пленки. В случае комбинированной изоляции расположение у фольги диэлектрика с большей диэлектрической проницаемостью также приводит к снижению напряженности у края обкладки и соответственно к повышению напряженности ЧР.

Однако основными мероприятиями повышения напряженности ЧР являются уменьшение толщины диэлектрика и повышение доли пленки в бумажно-пленочной изоляции.

Толщина диэлектрика в секции силового конденсатора не является фиксированной, но зависит от коэффициента запрессовки. С увеличением коэффициента запрессовки напряжение возникновения ЧР возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением k уменьшается общая толщина диэлектрика, при этом уменьшается и толщина прослоек свободной пропитывающей жидкости, что увеличивает их электрическую прочность.

Несколько иные зависимости $E_{чр}(d_с)$ имеют место для изоляции с воздушными включениями. Такие включения могут образоваться в результате неправильного технологического процесса изготовления изоляции, неправильной эксплуатации, а также в результате воздействия перенапряжений и развития ЧР (например, хотя бы кратковременного существования критических ЧР). Для изоляции с резко неоднородным полем и газовыми включениями зависимость напряженности ЧР от толщины диэлектрика также определяется процессами на краю электродов и соответствует (9.33). Для изоляции со слабонеоднородным или однородным полем и газовыми включениями эти соотношения могут быть получены из рассмотрения эквивалентной схемы диэлектрика с газовым включением согласно рис. 9.1. В этом случае напряженность начальных ЧР [1.1]

$$E_н = \frac{U_{в.з}}{\varepsilon_{r д} d_в}\left[\varepsilon_{r в} + \frac{(\varepsilon_{r д} - \varepsilon_{r в}) d_в}{d_с}\right], \qquad (9.42)$$

где $\varepsilon_{r_{\text{в}}} \approx \varepsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость газа; $\varepsilon_{r_{\text{д}}}$ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика; $d_{\text{в}}$ — толщина включения.

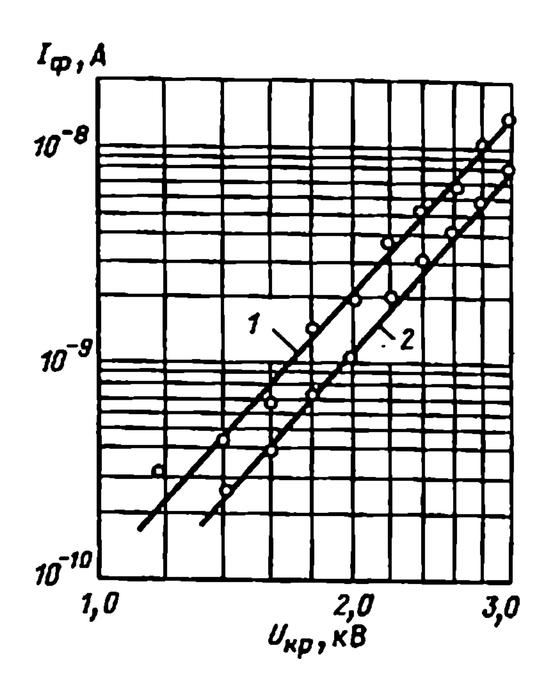
Выражение (9.43) показывает, что при неизменных размерах включения напряженность ЧР в области однородного поля падает с ростом толщины диэлектрика, однако зависимость $E_{\text{н}}(d_{\text{с}})$ в этом случае значительно слабее, чем в сильнонеоднородном поле.

Для повышения напряжения и напряженности ЧР и соответственно рабочей напряженности электрического поля можно использовать скругление края фольги, что обычно достигается загибом края фольги. При закруглении края фольги с радиусом закругления r для определения $E_{\text{чр}}$ можно пользоваться формулой, аналогичной (9.33), в которой для случая расположения обкладок по рис. 2.1

$$E_{\text{чр}} = E_{\text{ч}0} \sqrt{\frac{4\pi r}{d_{\text{с}} + r}}. \qquad (9.43)$$

Как показано в [9.11, 9.13, 9.14], скругление края фольги дает повышение напряжения начальных ЧР на 15—20% (см. рис. 9.6, кривая *б*), однако не столь значительно, какое можно было ожидать на основании расчета электрического поля, что можно объяснить зависимостью $E_{r0} = E_{\text{р}0}$ от толщины фольги. На рис. 9.10 приведены зависимости анодного тока фотоэлектронного умножителя, пропорционального мощности ЧР, от воздействующего на изоляцию напряжения. В первой партии (кривая *1*) образцы имели электроды из алюминиевой фольги толщиной 20 мкм (два слоя по 10 мкм) без специальной обработки края, а во второй партии (кривая *2*) электроды имели ту же толщину 20 мкм, но с радиусом скругления около 10 мкм (загиб края фольги толщиной 10 мкм). Как следует из рисунка, увеличение радиуса скругления края электрода дало повышение напряжения начальных ЧР, измеренных на уровне 10^{-14}—10^{-15} Кл, примерно на 15%. Это можно объяснить тем, что одновременно с увеличением радиуса скругления снижается напряженность у края электрода, однако увеличивается площадь поверхности электродов, у которой напряженность имеет наибольшее значение, и толщина прослойки жидкого диэлектрика.

В секциях за счет колебания размеров фольги в пределах допуска и неизбежного разбега при намотке один край фольги периодически оказывается утопленным внутри секции. Это приводит к увеличению напряженности на утопленном краю фольги, причем если смещение превосходит на порядок и более толщину изоляции, то, как следует из формул (1), (3), (5) табл. 2.1, напряженность на утопленном крае фольги возрастает приблизительно в 2 раза [9.13, 9.14].



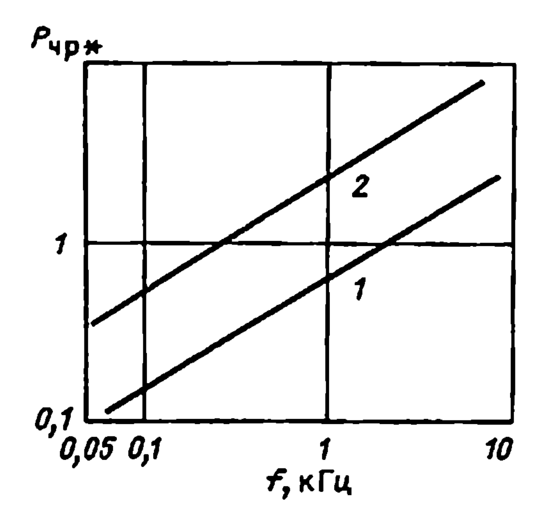


Рис. 9.11. Зависимость относительной мощности ЧР от частоты приложенного напряжения (d_c = 30 мкм):
1 — E=40 МВ/м; 2 — E=50 МВ/м

Рис. 9.10. Зависимость мощности ЧР (анодного тока $I_ф$ ФЭУ) от напряжения на образцах изоляции толщиной 60 мкм; толщина фольги 20 мкм:
1 — без скругления края фольги; 2 — со скруглением края фольги, радиус скругления 10 мкм

Для улучшения характеристик ЧР и повышения ресурса противоположные обкладки предполагается располагать со строго контролируемым сдвигом. Целесообразно покрывать утопленный край обкладки тонким слоем твердого электроизоляционного материала или загибать его по всей длине, при этом также целесообразно покрывать его твердым изоляционным материалом. Диэлектрическая проницаемость твердого покрытия должна быть выше, чем у жидкости и пленки. Покрытие может наноситься путем отверждения полимеров в тлеющем разряде или традиционными способами (как, например, полиэфиры, поликарбонат и др).

Зависимость характеристик ЧР от частоты приложенного напряжения. Повышение частоты приложенного напряжения не меняет характера зависимости мощности ЧР $P_{чр}$ от напряженности электрического поля, однако приводит к увеличению интенсивности ЧР, что можно объяснить увеличением числа полупериодов, а следовательно, и числа разрядов в секунду $n_{чр}$ (см. рис. 9.3). Однако увеличение $P_{чр}$ и $n_{чр}$ с ростом частоты f происходит не пропорционально частоте, как это следует из формул (9.17) и (9.16), а несколько слабее (рис. 9.11). На основании экспериментальных данных установлена следующая зависимость [9.6]:

$$P_{чр}=A_3 f^{0,62}. \qquad (9.44)$$

В диапазоне до 1 кГц электрическая прочность газовых включений и масляных прослоек практически не зависит от

частоты. Кроме того, распределение переменного напряжения по толщине изоляции и на краю электрода (при удельном поверхностном сопротивлении 10^{11} Ом) определяется соответствующими значениями диэлектрической проницаемости, которые для частоты до 10 кГц в большинстве случаев слабо зависят от частоты. Поэтому в области частот до 10^5 Гц напряженность начальных ЧР практически не зависит от частоты.

Если начальные ЧР в изоляции возникают в результате пробоя масляных пленок, то в этом случае при частотах более 10^5 Гц необходимо учитывать снижение электрической прочности масла с ростом частоты. Например, при повышении частоты от 50 до 10^6 Гц прочность конденсаторного масла снижается примерно на 30%. Указанное обстоятельство приводит к соответствующему снижению напряжения и напряженности начальных ЧР. Напряжение и напряженность критических ЧР существенно зависят от частоты приложенного напряжения.

Если возникновение критических ЧР определяется условием (9.24), что имеет место для изоляции, пропитанной нефтяным маслом, то при различных частотах это условие имеет вид

$$v_{\text{чр}\,f}=v_{\text{чр}\,50}, \tag{9.45}$$

где $v_{\text{чр}\,50}$ и $v_{\text{чр}\,f}$ — интенсивность газовыделения в единицу времени при напряжении частотой 50 Гц и f, поскольку интенсивность газопоглощения от частоты приложенного напряжения не зависит.

Тогда, используя (9.17) и (9.23) с учетом $U_з \approx U_п \approx U_н$, получаем

$$v_{\text{чр}\,f}=P_{\text{чр}}B=2fB(C_д+C_в)(U_{нm}-U_{в.н})(U_{в.з}+U_{в.п})=$$
$$=2fB(C_д+C_в)\eta^2 U_н(U_m-U_н). \tag{9.46}$$

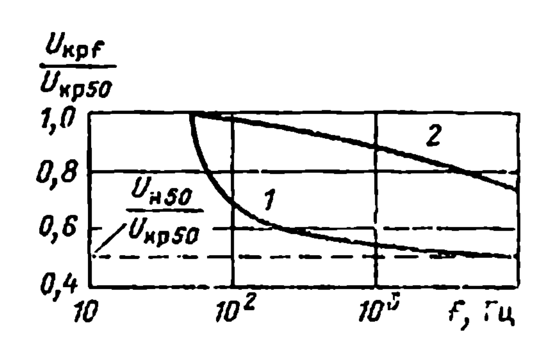
Так как напряжение начальных ЧР слабо зависит от частоты, то условие (9.45) для возникновения критических ЧР на основании (9.46) можно представить следующим образом:

$$U_{\text{кр}\,f}-U_н=\frac{50}{f}(U_{\text{кр}\,50}-U_н). \tag{9.47}$$

Из (9.47) находим

$$U_{\text{кр}\,f}=\frac{50}{f}(U_{\text{кр}\,50}-U_н)+U_н. \tag{9.48}$$

Таким образом, при достаточно больших частотах напряжение критических ЧР стремится к напряжению начальных ЧР. Расчетная зависимость, вычисленная по (9.48) для изоляции толщиной 80 мкм из конденсаторной бумаги, пропитанной нефтяным маслом и совпадающая с аналогичной опытной



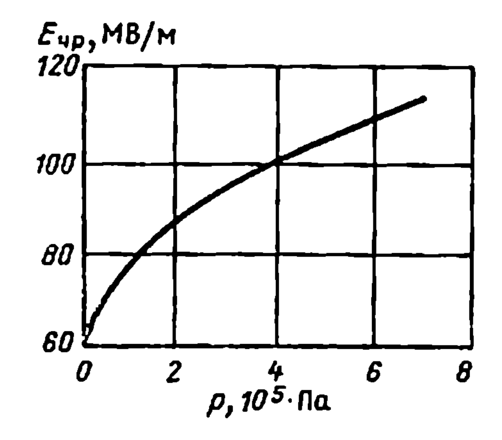


Рис. 9.12. Зависимость напряжения критических ЧР от частоты приложенного напряжения для бумажной изоляции:
1 — пропитка конденсаторным маслом; 2 — пропитка трихлордифенилом

Рис. 9.13. Зависимость напряжения критических ЧР от давления масла (d_c = 50 мкм)

зависимостью, приведена на рис. 9.12. Как следует из этого рисунка, при f > 1 кГц напряжение критических ЧР практически не отличается от напряжения начальных ЧР. Для изоляции с пропиткой хлоридифенилами зависимость напряжения критических ЧР от частоты заметно слабее вследствие большей стойкости этих жидкостей к газовыделению в электрическом поле.

Зависимость характеристик ЧР от избыточного давления пропитывающего состава. Повышение избыточного давления пропитывающего состава приводит к увеличению напряжения ЧР. Такое влияние избыточного давления сказывается при ЧР, являющихся результатом пробоев как прослоек жидкого диэлектрика, так и газовых включений. В первом случае с ростом избыточного давления увеличивается электрическая прочность жидкости. Это увеличение имеет место как для дегазированного, так и для недегазированного жидкого диэлектрика, хотя для дегазированного диэлектрика зависимость несколько слабее. Во втором случае с ростом давления увеличивается прочность газового включения. Пробои газовых включений возможны, когда размеры их достаточно велики и достигают десятки микрон и более. Для включений таких размеров с повышением избыточного давления пробивное напряжение возрастает.

На рис. 9.13 приведена зависимость $E_{кр}$ от избыточного давления масла [9.3]. Анализ кривой рис. 9.13 показывает, что напряжение критических ЧР с ростом давления увеличивается приблизительно во столько же раз, во сколько увеличивается прочность нефтяного масла. Зависимость напряженности критических ЧР от давления $P_ж$ в диапазоне от 10^5 до

$7 \cdot 10^5$ Па для конденсаторной изоляции из бумаги КОН-1 может быть представлена в виде

$$E_{кр} = 35(1 + 1,1 \cdot 10^{-6} P_ж), \qquad (9.49)$$

где

$$E_{кр} \text{ — в МВ/м}, \quad P_ж \text{ — в Па}.$$

Опыт показывает, что повышение избыточного давления сверх определенного значения нерационально, так как приводит к незначительному повышению кратковременной электрической прочности изоляции, что ограничивает допустимые напряженности, при этом выбираемые уже с точки зрения кратковременной прочности и воздействующих перенапряжений. Так, для конденсаторной изоляции с толщиной диэлектрика 50—100 мкм повышение давления рационально до $(6-8) \cdot 10^5$ Па. Обычно конденсаторы с избыточным давлением масла изготовляются при давлениях до $(3-4) \cdot 10^5$ Па. Уменьшение давления ниже атмосферного может привести к снижению напряжения ЧР [9.7]. Такое явление может произойти вследствие снижения давления в герметизированном конденсаторе при уменьшении температуры.

Зависимость напряженности ЧР от температуры. Напряженность ЧР в диэлектрике конденсатора зависит от температуры, причем температурное изменение ее различно для пропитки маслом и полярными жидкостями. Для бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур от 40 до 80° С имеет место весьма слабая тенденция к увеличению напряженности ЧР с ростом температуры (рис. 9.14, *а*, кривая *1*). Бумажный диэлектрик, пропитанный полярными жидкостями, имеет более сложную температурную зависимость (кривые *2*—*5*) [9.8]. Для этой зависимости характерно наличие минимума $E_{кр}$. На частоте 50 Гц минимум $E_{кр}$ имеет место при температуре $T_м$, превышающей температуру $T_д$ дипольного максимума $\operatorname{tg}\delta$ примерно на 30° С и совпадающей с температурой минимума $\operatorname{tg}\delta$ [9.8]. При температуре $T_м$ значение $E_{кр}$ практически вдвое меньше ее значения при температуре +100° С. Изменение $E_{кр}$ бумажного диэлектрика, пропитанного полярной жидкостью, при изменении температуры в пределах от значения $T_д$ до 373 К (+100° С) хорошо описывается эмпирической формулой (6.11) [9.9]. Изменение температуры от точки $T_м$ в ту или другую сторону имеет следствием увеличение $E_{кр}$. Наличие минимума в температурной зависимости $E_{кр}$ объясняется аналогичным минимумом в зависимости пробивной напряженности пропитывающих жидкостей от температуры (см. рис. 6.1). Несколько более слабый минимум в температурной зависимости наблюдается в конденсаторах с бумажно-пленочным

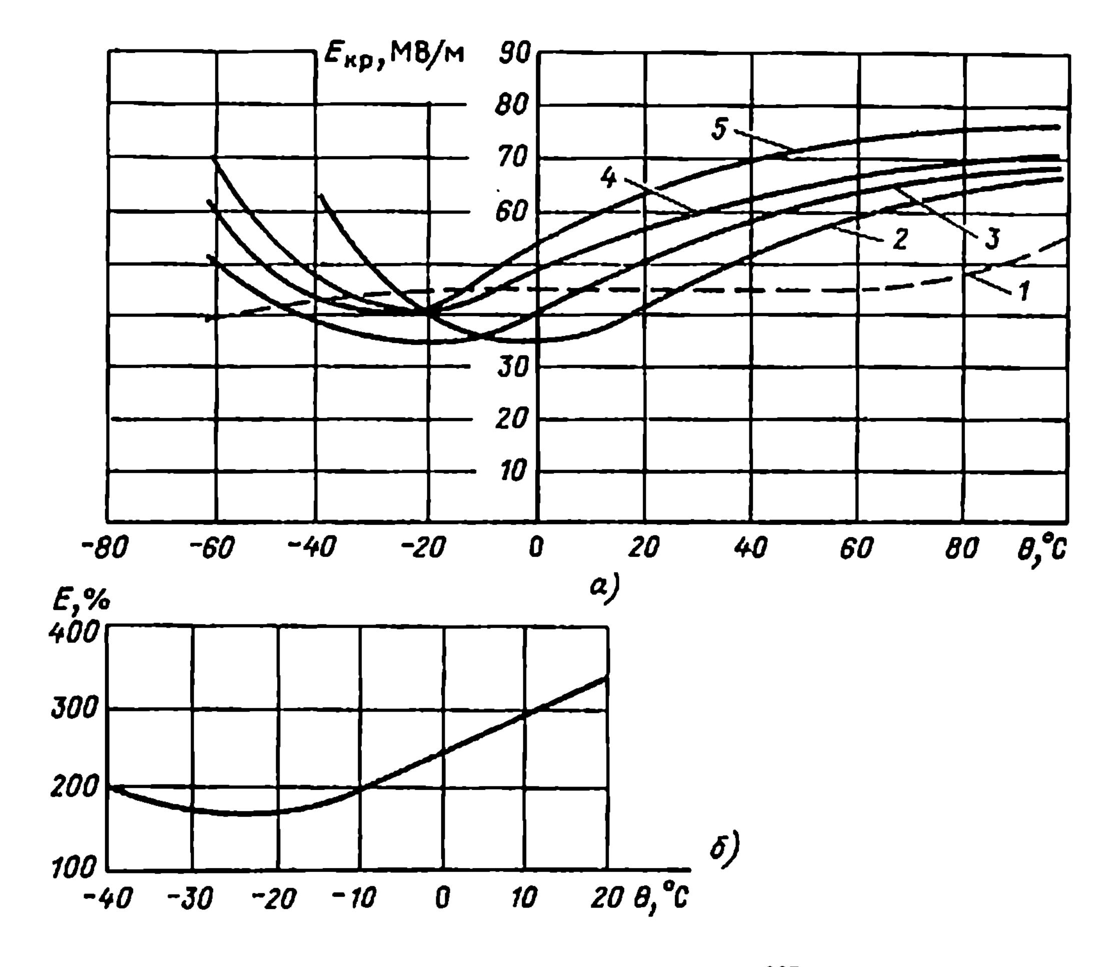


Рис. 9.14. Зависимость напряженности критических ЧР от температуры для бумажной изоляции, пропитанной различными жидкими диэлектриками (*а*) (*1* — нефтяное конденсаторное масло; *2* — трихлордифенил; *3* — КЖ1-35; *4* — КЖ2-45; *5* — КЖ2-50) и для пленочно-бумажного диэлектрика (полипропиленовая пленка, пропитка трихлордифенилом) (*б*) (на рис. *б* значения напряженности в процентах от рабочей)

диэлектриком на основе полипропиленовой пленки с пропиткой трихлордифенилом (см. рис. 9.14, *б*) [6.2].

Зависимость напряжения критических ЧР от формы кривой воздействующего напряжения. Как следует из (9.15), при синусоидальном напряжении число ЧР за полупериод определяется амплитудой приложенного напряжения и напряжениями зажигания и погасания ЧР. Так как после прохождения напряжения через максимум разряды возникают вновь после изменения напряжения на величину $\Delta U_1 = U_з + U_п$, то дополнительные ЧР за период возможны, если в кривой воздействующего напряжения имеются провалы глубиной более ΔU_1. Если в кривой провалов нет или они имеют меньшую глубину, то число ЧР за полупериод, а следовательно, и напряжение критических ЧР не зависят от формы этой кривой. Напряжение начальных ЧР зависит лишь от амплитуды и в любом случае от формы напряжения не зависит.

Влияние плотности бумаги на характеристики ЧР. Изменение плотности бумаги вызывает изменение характеристик ЧР. С одной стороны, увеличение плотности бумаги приводит к увеличению электрической прочности листов бумаги, во-первых, вследствие увеличения содержания клетчатки в листе, во-вторых, в результате сокращения размеров элементарных каналов в бумаге, заполненных пропитывающей жидкостью. С другой стороны, увеличение плотности бумаги при $\varepsilon_{r к} > \varepsilon_{r ж}$ приводит согласно соотношению (5.2а) к росту диэлектрической проницаемости листа бумаги $\varepsilon_{r б}$, что при $\varepsilon_{r ж} < \varepsilon_{r к}$ сопровождается увеличением напряженности в прослойках жидкого диэлектрика и приводит к снижению напряженностей ЧР. Вследствие этого влияние плотности бумаги по-разному сказывается на кратковременной и длительной прочности изоляции.

При определении кратковременной прочности преобладает влияние первого фактора, способствующего ее увеличению с ростом плотности бумаги. При определении длительной прочности, для которой частичные разряды в прослойках жидкого диэлектрика играют определяющую роль, увеличение плотности бумаги приводит к снижению напряжения (напряженности) ЧР и сокращению ресурса изоляции.

Влияние времени между изготовлением и испытанием. В бумажных конденсаторах напряжение ЧР возрастает в процессе хранения в течение первых 1—2 недель, особенно если конденсаторы были изготовлены при недостаточно высоком вакууме. Это можно объяснить растворением остаточного воздуха в пропитывающем составе [9.7], а также диффузией хлорированных жидкостей в полипропиленовую пленку. Для пленочных конденсаторов повышение напряжения ЧР происходит при хранении в течение 5 дней. В [9.7] для конденсаторов с изоляцией из полипропиленовой пленки, пропитанной трихлордифенилом, для достижения высоких значений напряжения ЧР указывается необходимость хранения в течение минимум 7—24 дней.

9.4. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ПРИ ПОСТОЯННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Эксплуатация изоляции конденсаторов на постоянном напряжении показала, что ЧР в ряде случаев оказывают существенное влияние на старение изоляции. В качестве примера можно указать на различие в ресурсе конденсаторов с твердой и с маловязкой пропиткой. У первых благодаря наличию газовых полостей и развитию в них интенсивных разрядов ресурс при постоянном напряжении значительно меньше. При постоянном напряжении, так же как и при переменном, ЧР

представляют собой пробои участков изоляции с пониженной электрической прочностью, например, газовых включений или пленок жидкого диэлектрика в слоистой изоляции. Существенное отличие в протекании процесса на постоянном напряжении заключается в том, что интенсивные ЧР типа критических имеют место только при включении напряжения или его изменении во времени. В результате ЧР на стенках газовых включений образуются поверхностные заряды. Дополнительное поле этих зарядов $E_{пов}$ направлено навстречу основному, что вызывает ослабление результирующей напряженности во включении.

В момент погасания разряда результирующая напряженность равна напряженности погасания $E_{в.п}$:

$$E_{рез}=E_{в.и}-E_{0\,пов}=E_{в.п}, \qquad (9.50)$$

где $E_{в.и}$ — напряженность во включении, создаваемая приложенным напряжением в предположении отсутствия в нем разряда. Схематически это показано на рис. 9.15. В дальнейшем после погасания разряда за счет проводимости бумаги и пропитывающего состава происходит стекание поверхностного заряда $q_{пов}$, при этом напряженность, созданная поверхностными зарядами, изменяется по закону

$$E_{пов}=E_{0\,пов}\exp\left(-t/\tau_{и}\right), \qquad (9.51)$$

где $\tau_{и}=\rho_{v}\varepsilon_{r}$ — постоянная времени стекания поверхностного заряда через проводимость изоляции.

Условием повторного ЧР для установившегося значения постоянного напряжения является равенство

$$E_{0\,пов}\left[1-\exp\left(-\Delta t/\tau_{и}\right)\right]=E_{в.з}-E_{в.п}. \qquad (9.52)$$

В результате стекания заряда напряженность во включении возрастает, и следующий ЧР произойдет, когда напряженность, создаваемая поверхностным зарядом, уменьшится на величину, равную разности между напряженностями зажигания $E_{в.з}$ и погасания $E_{в.п}$ ЧР.

Интервал времени между ЧР в рассматриваемом включении на основании (9.50) и (9.52)

$$\Delta t=\tau_{и}\left(E_{в.з}-E_{в.п}\right)/E_{0\,пов}. \qquad (9.53)$$

Учитывая также, что при значительных приложенных напряжениях $E_{в.п}\ll E_{в.и}$, на основании (9.50) получаем

$$E_{0\,пов}\approx E_{в.и} \qquad (9.54)$$

и

$$\Delta t=\tau_{и}\left(E_{в.з}-E_{в.п}\right)/E_{в.и}=\tau_{и}\left(U_{з}-U_{п}\right)/U. \qquad (9.55)$$

Таким образом, при заданной постоянной времени изоляции $\tau_{и}$ интервал между ЧР определяется степенью превышения приложенного напряжения U над напряжением зажигания $U_{з}$ или погасания $U_{п}$ ЧР. Обычно значение $\tau_{и}$ при температуре 20°С составляет сотни и тысячи секунд, в результате чего интервалы

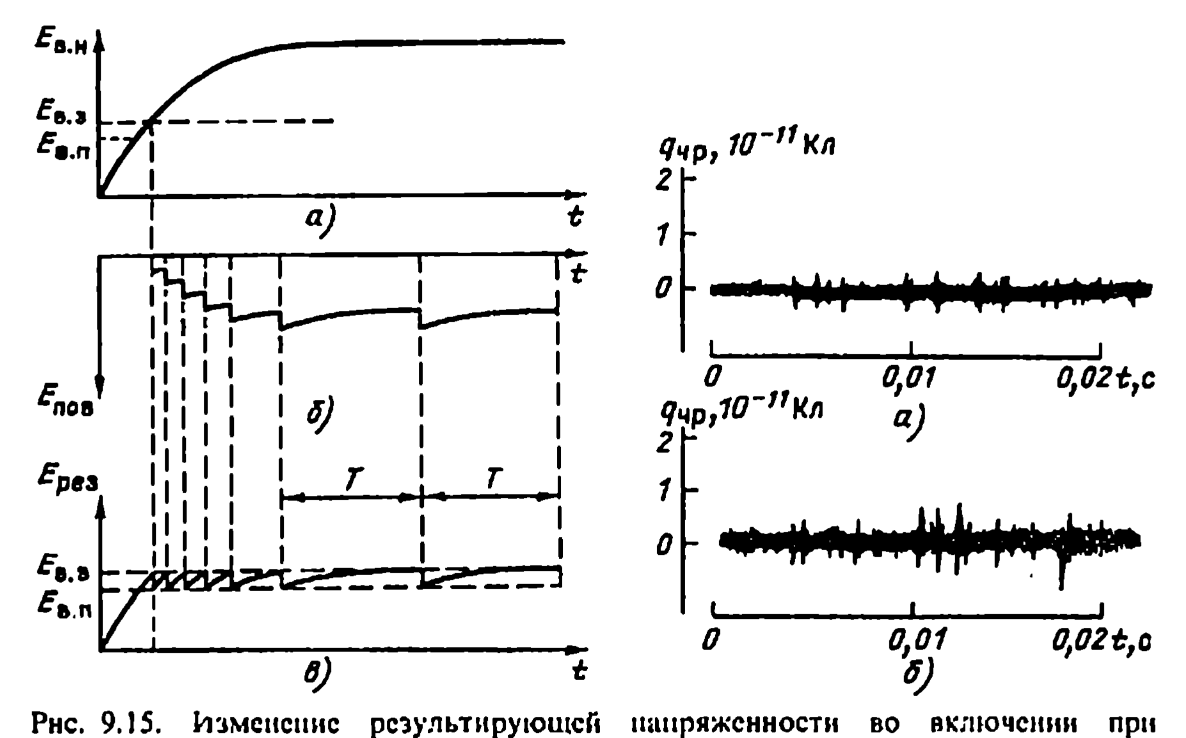


Рис. 9.15. Изменение результирующей напряженности во включении при воздействии постоянного напряжения:
а — напряженность поля, создаваемая приложенным напряжением; *б* — напряженность поля, создаваемая поверхностным зарядом; *в* — результирующая напряженность во включении

Рис. 9.16. Характерные осциллограммы ЧР при постоянном напряжении:
а — $\Theta = 20$ °С; *б* — $\Theta = 80$ °С

между ЧР во включении имеют длительность порядка единиц или десятков секунд. Это на несколько порядков меньше, чем при напряжении промышленной частоты. Характерные осциллограммы ЧР при постоянном напряжении приведены на рис. 9.16.

На постоянном напряжении даже при наличии острого края электрода ЧР развиваются по всей площади электрода. Это объясняется ослаблением краевого эффекта вследствие появления при постоянном напряжении значительной по сравнению с поперечной проводимостью продольной проводимости прослоек жидкого диэлектрика бумажно-пропитанной изоляции. При постоянном напряжении напряженности начальных ЧР значительно выше, чем при переменном, и существенно зависят от температуры изоляции (рис. 9.17) и ее влажности.

Изменение толщины конденсаторной изоляции в диапазоне от 30 до 300 мкм практически не сказывается на напряженности ЧР, что объясняется отсутствием влияния краевого эффекта электродов. При постоянном напряжении, так же как и при переменном, зависимости тока и мощности ЧП от напряжения напряженности хорошо описываются функциями

$$I_н = I_{н0}(E/E_н)^{a_1}; \qquad (9.56)$$

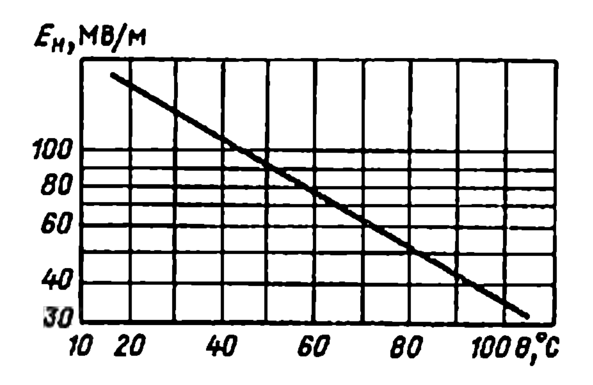


Рис. 9.17. Зависимость напряженности начальных ЧР от температуры при постоянном напряжении (бумага КОН-2, пропитанная конденсаторным маслом, $d_c = 80$ мкм)

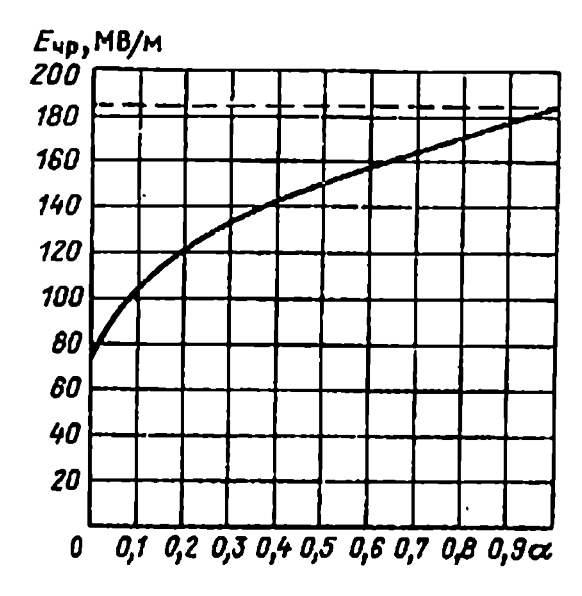


Рис. 9.18. Зависимость $E_{ч.р}$ при смешанном напряжении от α ($d_c = 50$ мкм): сплошная кривая — напряженность ЧР при переменном напряжении, амплитудные значения; пунктир — то же при постоянном напряжении

$$P_н = P_{н\,0}(E/E_н)^{a_3} = A_4 E^{a_3}, \qquad (9.57)$$

в которых показатели степени a_2 и a_3 существенно больше, чем в аналогичных зависимостях для переменного напряжения: $a_2 = 9$ и $a_3 = 10$. Для отдельных образцов $8 \leqslant a_3 \leqslant 14$.

9.5. ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ ПРИ СМЕШАННОМ НАПРЯЖЕНИИ

В конденсаторах, работающих при смешанном или пульсирующем (содержащем постоянную и переменную составляющие) напряжении, напряженность возникновения ЧР будет зависеть не только от электрофизических параметров компонентов, но и от соотношения между постоянной и переменной составляющими α, что нетрудно показать с помощью формул (3.5) с использованием (8.8). При α=0 (т. е. при равной нулю постоянной составляющей) напряженность возникновения ЧР будет совпадать со значением для переменного напряжения, при α=1 — для постоянного. При 0<α<1 значение $E_{чр}$ будет плавно изменяться от значения при переменном до значения при постоянном напряжении (рис. 9.18). При смешанном напряжении могут возникать как начальные, так и критические ЧР. Интенсивность критических ЧР уменьшается с увеличением α, и при значениях α, близких к единице, имеют место только начальные ЧР. Как и при других родах напряжения, при смешанном напряжении напряженность возникновения ЧР зависит от температуры и влажности диэлектрика. Влияние толщины диэлектрика также зависит от α. При малых α оно будет большим, при больших α — малым.

Глава десятая

РЕСУРС И НАДЕЖНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

10.1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И ВИДЫ СТАРЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ

В процессе эксплуатации изоляция силового конденсатора под воздействием электрического и теплового полей существенно ухудшает свои свойства вследствие необратимого изменения молекулярной структуры и состава образующих ее материалов. Это составляет физическое существо ее старения, которое нарастает со временем эксплуатации и приводит к отказу, т. е. к прекращению выполнения конденсатором своих функций. Конденсатор сохраняет свою работоспособность до тех пор, пока его электрическая прочность не снизится до уровня, при котором наступает пробой, или пока его $\operatorname{tg}\delta$ не достигнет значения, соответствующего границе тепловой устойчивости, после чего наступает тепловой пробой. Старение диэлектрика имеет три формы: ионизационную, при которой он разрушается возникающими в нем ЧР; тепловую, при которой происходит деструкция материала в основном за счет процессов окисления и определяется температурой диэлектрика; электрохимическую, при которой старение имеет главным образом электрохимическую природу. Обычно все три формы старения взаимосвязаны.

Основным фактором, определяющим интенсивность износа изоляции под напряжением, является напряженность электрического поля E. При переменном напряжении ее воздействие проявляется в форме возникновения ЧР, интенсивность разрушения изоляции которыми пропорциональна их мощности, при постоянном — в виде электрохимических процессов. Вторым важным фактором, влияющим на интенсивность разрушения изоляции, является температура T. Ее изменение может изменять (как правило, усиливать) действие электрического поля, а также изменять скорость протекания химических реакций, в том числе и между продуктами, возникающими при разложении материалов ЧР. Очевидно, чем интенсивнее воздействующие факторы (выше E и T), тем выше скорость разрушения и меньше ресурс («время жизни») изоляции. Изменение свойств изоляции вызывается происходящими в ней химическими процессами, в том числе термоокислительными реакциями. Примером химических превращений является термическая деструкция клетчатки. Электрохимическое разрушение обусловлено электролитическими процессами, связанными с переносом ионов, поскольку проводимость диэлектрика имеет

ионный характер. Оно зависит от напряжения, температуры и интенсифицируется с их возрастанием.

Изоляция обладает способностью в течение определенного времени выдерживать приложенное напряжение и противостоять разрушающему действию процессов, протекающих при этом напряжении. Эта способность может быть охарактеризована физическим ресурсом изоляции R, который определяется количеством твердого, жидкого или газообразного вещества, которое должно быть разрушено (образовано или выделено) для того, чтобы привести к нарушению работоспособности или резкому снижению электрической прочности изоляционной конструкции [9.3, 10.1]. Физический ресурс изоляции R зависит от структуры и размеров изоляции, видов диэлектриков, входящих в эту структуру, конструкции изоляции, расположения электродов и их формы, технологии изготовления изделия. Время, в течение которого этот запас может быть израсходован (для импульсных конденсаторов — число импульсов), называется техническим ресурсом или просто ресурсом изоляции τ. Он зависит от скорости разрушения изоляции, которая, в свою очередь, определяется качеством и свойствами использованных материалов, конструктивными факторами — формой и расположением обкладок, определяющих электрическое поле в секции, технологией изготовления, решающим звеном которой является процесс термовакуумной обработки, и режимом эксплуатации. Для данной конструкции ресурс будет определяться только режимом работы изоляции. Если для заданной изоляционной конструкции известна зависимость $S[E(t),\ T(t)]$, выражающая долю физического ресурса, расходуемого в единицу времени, и представляющая собой скорость старения изоляции или интенсивность воздействия факторов старения $E(t)$ и $T(t)$, являющихся в общем случае функциями времени, то связь между физическим R и техническим τ ресурсами определяется из соотношения

$$R=\int_0^\tau S[E(t),\ T(t)]\,dt. \qquad (10.1)$$

В первом приближении можно принять, что на протяжении всего срока службы значение $S(E,T)$, характеризующее интенсивность старения, остается неизменным. Тогда ресурс

$$\tau=R/S(E,\ T). \qquad (10.2)$$

Отыскание в явном виде функции $S(E,\ T)$ теоретическим путем представляет весьма трудную задачу, еще очень далекую от решения. Дополнительно она усложняется еще и тем, что в технических материалах содержатся случайно распределенные локальные дефекты, обусловливающие значительный разброс ресурса. Поэтому ресурс является величиной стохастической

и требует при его исследовании обязательного применения статистических методов. В практике при ресурсных исследованиях пользуются эмпирическими зависимостями ресурса от параметров режима.

Весомость каждого из элементарных механизмов в общем процессе разрушения изоляции различна и зависит от многих факторов. Отдельные механизмы старения взаимно влияют друг на друга. С изменением температуры изменяется не только скорость термической деструкции, но и ионная проводимость. Это справедливо как для постоянного, так и для переменного напряжения, но механизмы действия различны. При постоянном напряжении неметаллические ионы, разряжаясь у обкладок, могут образовывать химические вещества, взаимодействующие с диэлектриком; металлические ионы, разряжаясь у обкладок, могут образовывать проводящие дендриты. Рост ионного тока при переменном напряжении имеет следствием рост $\operatorname{tg}\delta$.

Старение диэлектрика в реальном конденсаторе происходит неравномерно по его объему, и ресурс определяется наиболее слабым местом, при этом основная часть диэлектрика может быть сравнительно мало изношенной. Локальный $\operatorname{tg}\delta$ в слабом месте может быть большим, тогда как общий $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика может мало отличаться от его первоначального значения. Ухудшение $\operatorname{tg}\delta$ в процессе эксплуатации конденсатора, как правило, свидетельствует о возникновении дефектов в его изоляции. Определяющим является не только численное значение $\operatorname{tg}\delta$, но и его стабильность во времени. Если повышение $\operatorname{tg}\delta$ таково, что при его новом значении конденсатор не выходит за пределы термической стабильности и это значение остается неизменным во времени, конденсатор работоспособен. Однако неизменность $\operatorname{tg}\delta$ при эксплуатации еще не является гарантией отсутствия дефектов и его безотказной работы. Из изложенного следует, что $\operatorname{tg}\delta$ не всегда может служить критерием степени износа изоляции в целях его количественной оценки. Измерения емкости, сопротивления изоляции или тока утечки также не дают полной информации о степени износа изоляции.

При любых формах старения в большинстве случаев наиболее слабым звеном является пропитывающая жидкость, которая наиболее сильно подвержена изменениям в процессе старения. Разложение жидкости, например, под воздействием ЧР приводит к газовыделению, а также к появлению новых продуктов, увеличивающих проводимость и $\operatorname{tg}\delta$, что создает опасность развития теплового пробоя. Окислительные процессы также приводят к возрастанию $\operatorname{tg}\delta$ жидкости, к появлению влаги, снижению электрической прочности изоляции. Поэтому характеристики жидкости, а в первую очередь ее газостойкость

и стойкость против окисления, оказывают большое влияние на процессы старения конденсаторного диэлектрика. Применение для пропитки конденсаторов жидкостей с более высокой газостойкостью и стойкостью против окисления приводит к замедлению процессов старения и увеличению ресурса, а при неизменном ресурсе позволяет повысить рабочие напряженности в диэлектрике, что имеет следствием повышение удельных характеристик конденсатора. В жидком диэлектрике в процессе старения происходит не только разрушение молекул жидкости, но и их полимеризация. Следствием этих процессов является появление воды, водорода, органических кислот, СО, CO_2, x-воска и других продуктов. Состав продуктов старения при тепловом старении под напряжением и без напряжения существенно различается. Недосушивание диэлектрика и высокое остаточное газосодержание пропитывающей жидкости ускоряют процесс старения. Недосушивание интенсифицирует гидролиз бумаги, вследствие чего снижаются степень ее полимеризации и механическая прочность, а увеличение остаточного газосодержания облегчает возникновение ЧР.

Увеличение проводимости жидкого диэлектрика имеет следствием повышение $\operatorname{tg}\delta$, что особенно заметно проявляется в изменении зависимости $\operatorname{tg}\delta$ слоистого диэлектрика от напряжения в области малых напряженностей (рис. 10.1). Осциллографирование тока потерь в такой изоляции показывает, что в этом случае в кривой тока потерь появляется характерный пик (рис. 10.2). В результате такого старения изменяются характеристики в основном всего объема жидкости диэлектрика, что завершается обычно тепловым пробоем изоляции. Введением в пропитывающую жидкость различных добавок, называемых стабилизаторами и связывающих образующиеся в процессе старения и ухудшающие свойства диэлектрика продукты, можно существенно замедлить скорость старения изоляции и тем самым повысить ресурс и надежность конденсатора.

Характеристики конденсаторной бумаги оказывают значительное влияние на кратковременную и длительную электрическую прочность изоляции конденсаторов. Электрическая прочность конденсаторной бумаги определяется числом токопроводящих включений и числом слабых мест с электрической прочностью, меньшей половины средней пробивной напряженности, на единицу площади. В [10.2] установлено, что на электрическую прочность бумаги наиболее сильное влияние оказывает число слабых мест (рис. 10.3), при этом возникает тесная корреляционная связь между электрической прочностью конденсаторов и прочностью сухой конденсаторной бумаги (рис. 10.4). Характеристики бумаги значительно сказываются и на процессах старения изоляции конденсаторов [10.3]. На рис. 10.5 приведены температурные зависимости

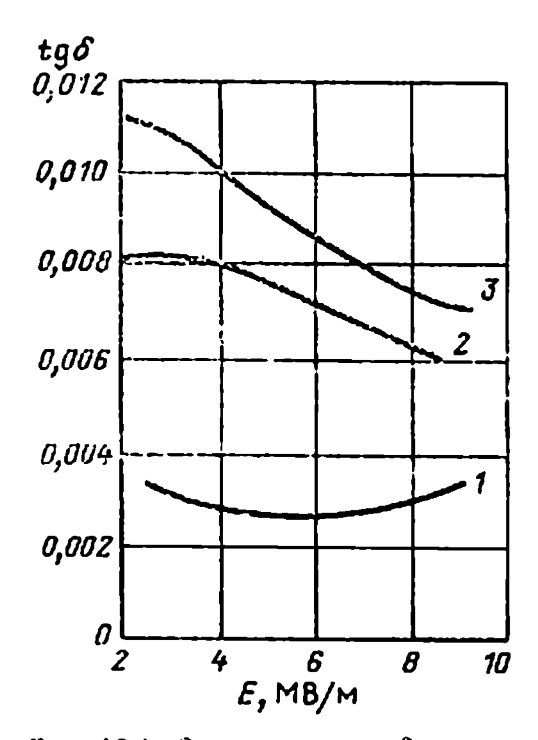


Рис. 10.1. Зависимость tgδ от напряженности для образцов бумажно-масляной изоляции:

1 — до выдержки под напряжением; 2 — после выдержки под напряжением $2U_р$ в течение 1300 ч; 3 — после дополнительной выдержки напряжением $2U_р$ в течение 1900 ч

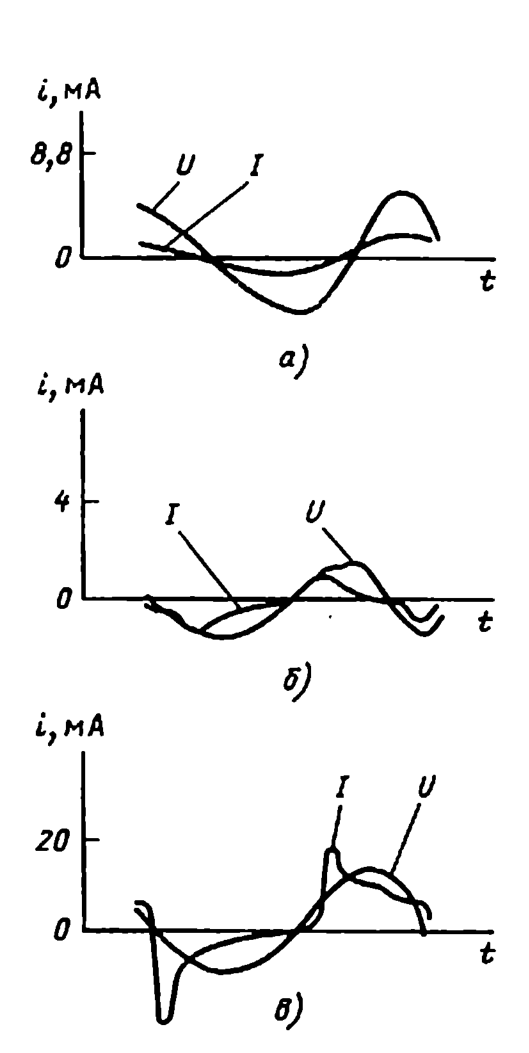
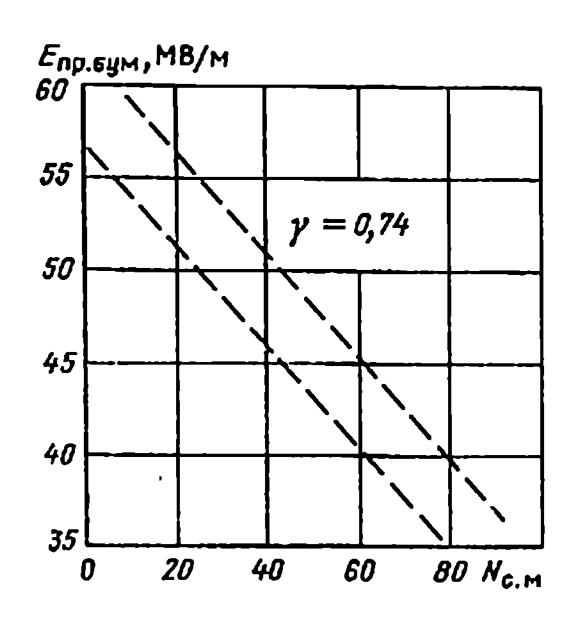


Рис. 10.2. Осциллограммы тока потерь в секциях бумажно-масляных конденсаторов, бывших различное время в эксплуатации при $E=15{,}5$ МВ/м:

а — новый конденсатор; *б* — после 1 года эксплуатации; *в* — после 5 лет эксплуатации

tgδ конденсаторов, изготовленных из различных бумаг, пропитанных трихлордифенилом, до и после старения в течение 1000 ч при $E=15$ МВ/м и температуре 100° С. Как следует из этого рисунка, в процессе старения наиболее сильно возрастают значения tgδ в области 20—40° С, причем наименьшее изменение tgδ имеет место для бумаги АНКОН с наполнителем (сорбентом). Для конденсаторов с бумажной изоляцией, пропитанной касторовым маслом и подвергнутых ускоренному старению при постоянном напряжении ($E=50$ МВ/м) и $\Theta=100°$ С, наблюдалась четкая корреляционная зависимость между относительным числом конденсаторов, вышедших из строя в процессе старения, и числом слабых мест в исходной конденсаторной бумаге (рис. 10.6).

О влиянии структуры бумажно-пленочной изоляции на процессы старения имеются различные мнения. В большинстве случаев в настоящее время диэлектрическая проницаемость пленки $\varepsilon_{rп}$ меньше диэлектрической проницаемости бумаги.



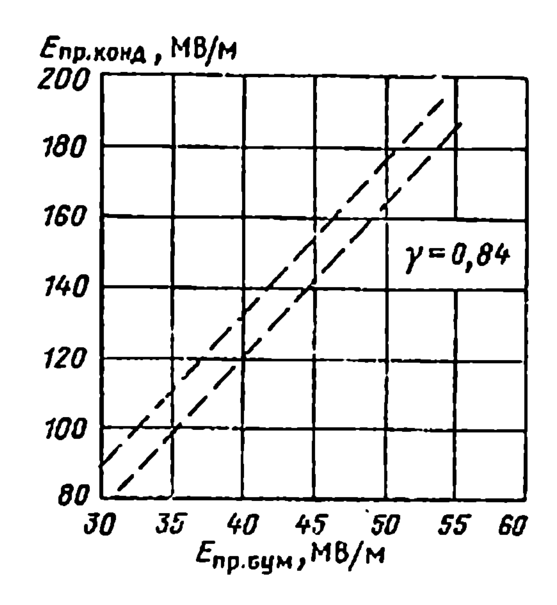


Рис. 10.3. Связь электрической прочности конденсаторной бумаги с числом слабых мест на 1 м² площади $N_{с.м}$ (γ — коэффициент корреляции)

Рис. 10.4. Связь электрической прочности конденсаторов, пропитанных трихлордифенилом, с электрической прочностью сухой конденсаторной бумаги. Изоляция состоит из двух листов толщиной по 8—10 мкм (γ — коэффициент корреляции)

Из данных, приведенных в гл. 9 [9.9, 9.10], следует, что при одинаковой доле неполярной пленки в бумажно-пленочной изоляции более высокие напряженности ЧР имеют место при расположении слоев бумаги у фольги. Это, однако, обычно приводит к уменьшению доли пленки в изоляции, так как для выполнения указанного расположения количество слоев бумаги следует брать на один больше числа слоев пленки. В [9.10] указывается также, что повышение напряженности ЧР тем больше, чем выше доля пленки в бумажно-пленочной изоляции. Как следует из изложенного, указанные два мероприятия, приводящих к повышению напряженности ЧР и рабочей напряженности,—повышение доли пленки в комбинированной изоляции и расположение слоев бумаги у фольги — являются противоречивыми. В связи с этим большинство заводов-изготовителей применяют бумажно-пленочный диэлектрик пониженной толщины (30—36 мкм) с повышенной долей пленки и состоящий из двух слоев полипропиленовой пленки, между которыми располагается слой конденсаторной бумаги.

В конденсаторах с металлизированным диэлектриком может происходить коррозия металлического слоя и его разрушение без повреждения диэлектрика вследствие ЧР в прослойках внутри конденсатора [10.5]. Устранение ЧР в конденсаторах с металлизированным диэлектриком возможно путем пропитки жидкими диэлектриками.

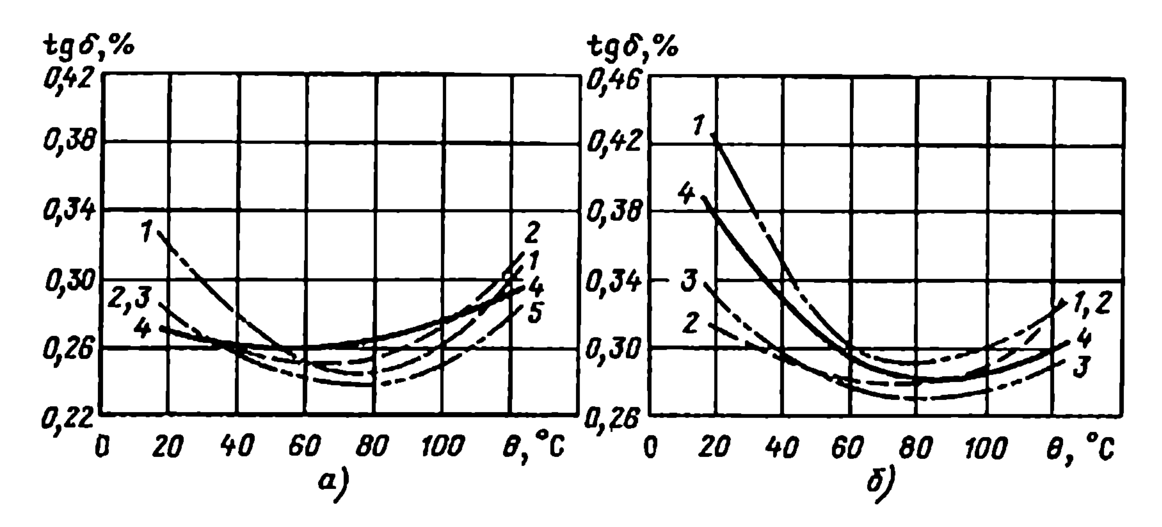


Рис. 10.5. Температурные зависимости tgδ конденсаторов, изготовленных из различных конденсаторных бумаг, до старения (*а*) и после старения (*б*); пропитка трихлордифенилом:
1 — КОН-1 — 10; *2* — АНКОН-1 — 10; *3* — «Терокс 1 — 10»; *4* — МКОН-1 — 10

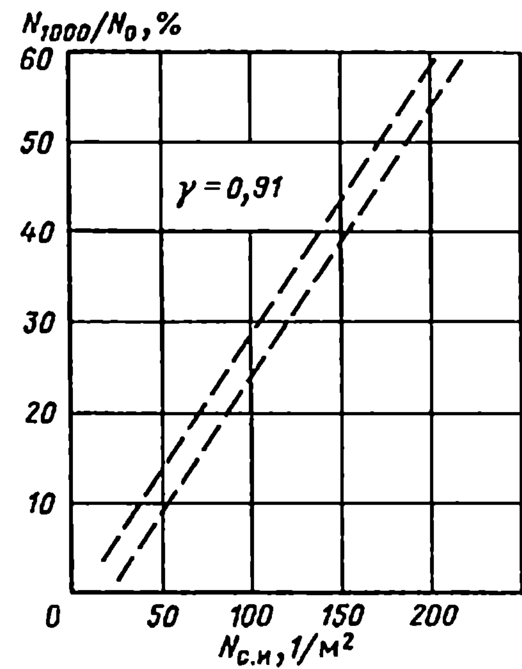


Рис. 10.6. Связь относительного числа пропитанных касторовым маслом конденсаторов, вышедших из строя в процессе ускоренного старения, с числом слабых мест в исходной конденсаторной бумаге (γ — коэффициент корреляции)

В процессе эксплуатации реальных конденсаторов в них имеют место несколько форм старения одновременно. При определенных условиях одна из форм может превалировать над другими и определять ресурс конденсатора. Ионизационная форма старения может быть как при переменном, так и при постоянном напряжении, но так как интенсивность ЧР при переменном напряжении значительно больше, чем при постоянном, то ионизационное старение наиболее заметно при переменном напряжении. Тепловая форма старения может иметь место при работе конденсатора как на переменном, так и на постоянном напряжении, так как закономерности теплового старения определяются только количеством выделяющегося в диэлектрике тепла. При постоянном напряжении потери значительно меньше, чем при переменном, поэтому

тепловое старение наиболее сильно проявляется в конденсаторах, работающих при переменном напряжении. Электрохимическое старение развивается преимущественно при постоянном напряжении.

При воздействии на диэлектрик смешанного напряжения могут наблюдаться несколько различных форм старения одновременно. Интенсивность каждой из них зависит от соотношения постоянной и переменной составляющих. Для доли переменной составляющей от 70% и меньше определяющими механизмами старения являются электрохимический и тепловой.

10.2. СТАРЕНИЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Старение конденсаторного диэлектрика под воздействием ЧР, или ионизационное старение, относится к чисто электрическим видам старения. Под воздействием ЧР в первую очередь разрушается пропитывающая жидкость. Этому процессу может сопутствовать ряд других: взаимодействие продуктов разложения с твердой фазой диэлектрика, полимеризация, образование или присоединение радикалов, эрозия твердой фазы вследствие бомбардировки ее электронами и ионами, что определяется природой жидкости и характером продуктов ее разложения. При длительном воздействии сравнительно небольших напряженностей происходит постепенное загрязнение диэлектрика продуктами разложения, приводящее к повышению его проводимости и $\operatorname{tg}\delta$. В токе потерь появляется характерный пик (см. рис. 10.2). При повышении $\operatorname{tg}\delta$ повышается опасность возникновения теплового пробоя. Если в продуктах разложения превалируют газообразные продукты, как, например, в нефтяном масле, в диэлектрике быстро образуется концентрированная газовая фаза, напряженность возникновения ЧР резко снижается и ЧР переходят в критическую форму, в результате чего быстро разрушается диэлектрик. Если конденсатор с пропиткой нефтяным маслом, в котором образовались концентрированные газовые включения, отключить от напряжения, то вследствие диффузии газовая фаза через некоторое время растворится в жидкой и в масле практически полностью восстановится первоначальное значение напряженности возникновения ЧР. Это будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнуто насыщение жидкости газом, после которого дальнейшее растворение газа прекращается. При разложении ЧР хлордифенилов из них выделяется углерод, который шунтирует очаг возникновения ЧР, и они прекращаются. Плохая термовакуумная обработка конденсаторов усиливает

процесс разрушения диэлектрика вследствие разложения оставшейся влаги.

Значительное влияние на интенсивность ЧР оказывают твердые включения, как находящиеся в бумаге (фиксированные), так и находящиеся в жидкости (подвижные), которые увеличивают напряженность поля в месте своего нахождения [10.6]. Это имеет важное значение для конденсаторов, напряженности поля в которых больше, например, для бумажно-пленочного диэлектрика. Частицы могут попадать в диэлектрик в виде пылинок при намотке вследствие притяжения их статическими зарядами электризованной пленки. Поэтому к микроклимату помещения, в котором производится намотка секций, предъявляются особо жесткие требования по его запыленности. Обычно в 1 л воздуха этих помещений не должно содержаться более 500 частиц размером от 2 мкм и менее.

Количество материала, разрушаемого при ЧР в единицу времени, или скорость разрушения изоляции, пропорциональная мощности ЧР,

$$S=BP_{чр}, \tag{10.3}$$

где B — количество материала, разрушаемого разрядом с энергией в 1 Дж; $P_{чр}$ — мощность ЧР.

Для конденсаторов, работающих на переменном напряжении, связь между $P_{чр}$ и напряжением частоты 50 Гц может быть представлена эмпирической зависимостью (9.19) [9.1]:

$$P_{чр}=A_{чр}\,U^{a_{чр}}, \tag{10.4}$$

в которой $A_{чр}$ и $a_{чр}$ — постоянные.

Подставив $P_{чр}$ из (10.4) в (10.3) и последнюю в (10.2), в общем виде можно найти зависимость ресурса конденсатора от напряжения при старении под воздействием ЧР:

$$\tau=R/(BP_{чр})=A_1\,U^{-a_{чр}}=AE^{-a_{чр}}. \tag{10.5}$$

Таким образом, при старении под воздействием ЧР ресурс обратно пропорционален мощности ЧР.

Воздействие на конденсатор перенапряжений может приводить к возникновению ЧР и усилению процессов старения диэлектрика конденсатора, что проявляется в увеличении $\operatorname{tg}\delta$ изоляции, который зависит только от стойкости жидкости против разложения в электрическом поле и, в частности, от ее газостойкости. На рис. 10.7 приведены зависимости изменения $\operatorname{tg}\delta$ от числа перенапряжений для конденсаторов с бумажно-полипропиленовым диэлектриком, пропитанным различными жидкими диэлектриками [10.6]. Исследуемые жидкости по газостойкости можно расположить в следующем порядке (начиная с наиболее газостойких): ФКЭ, БНК, ДОФ, конденсаторное масло, имеющее наименьшую газостойкость. Как

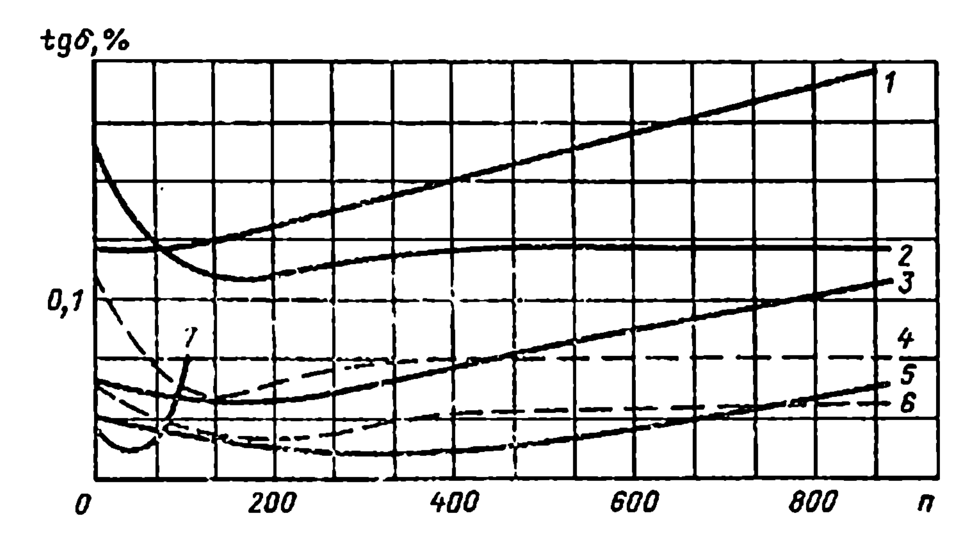


Рис. 10.7. Зависимость tg δ образцов конденсаторов с комбинированным диэлектриком от числа перенапряжений. Кратность перенапряжений $2{,}25\,U_{ном}$, длительность перенапряжений 1 с, $f=50$ Гц, интервал между напряжениями 5 мин, $E_{ном}=35$ МВ/м, $d_c=35$ мкм (два листа полипропиленовой пленки 12,5 мкм и один лист конденсаторной бумаги 10 мкм). Пропиточная жидкость: *1* — диоктилфталат (ДОФ); *2* — стабилизированный трихлордифенил; *3* — бензилнеокаприанат (БНК); *4* — стабилизированный БНК; *5* — фенилксилилэтан (ФКЭ); *6* — стабилизированный ФКЭ; *7* — конденсаторное масло

следует из рис. 10.7, пропитка жидкостями, наиболее стабильными в электрическом поле, приводит к наименьшему изменению tg δ изоляции при воздействии перенапряжений.

10.3. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОВОГО СТАРЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

При длительном воздействии температуры изменение свойств полимерных материалов происходит вследствие процессов полимеризации и поликонденсации, окислительных процессов и термической деструкции. Закономерности изменения определяются кинетикой протекания этих процессов. В общем случае скорость химической реакции увеличивается с повышением температуры. Опыт показывает, что скорость реакции возрастает в 2—4 раза при увеличении температуры на 10° С. Влияние температуры на скорость химической реакции характеризуется температурным коэффициентом скорости реакции, представляющим отношение константы скорости реакции при температуре $T+10$ К константе скорости при температуре T. В среднем этот коэффициент равен трем.

Общее выражение, связывающее константу скорости реакции c_T с температурой T в K, получается из уравнения Аррениуса

$$c_T = B_T \exp(-b_T/T), \qquad (10.6)$$

где b_T и B_T — постоянные.

Если известно уравнение, описывающее протекание химической реакции во времени, то, подставив в него c_T из (10.6), можно получить аналитическую зависимость ресурса от температуры:

$$\tau = A_T \exp(b_T/T) \qquad (10.7)$$

или

$$\tau = \tau_0 \exp\left[b_T\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right], \qquad (10.8)$$

где τ и τ_0 — ресурсы изоляции при температурах T и T_0 соответственно.

С учетом (10.5) зависимость ресурса от напряженности и температуры будет определяться выражением

$$\tau = \tau_0 (E_0/E)^{a_{чр}} \exp\left[b_T(1/T - 1/T_0)\right], \qquad (10.9)$$

в котором τ — ресурс изоляции при температуре T и напряженности E; τ_0 — то же при температуре T_0 и напряженности E_0; $a_{чр}$ — показатель степени в зависимости мощности ЧР от напряженности.

Рассмотрим подробно имеющий важное практическое значение конкретный пример термической деструкции клетчатки, представляющий мономолекулярную химическую реакцию распада ее молекул под воздействием температуры, что имеет следствием ухудшение физических, электрических и механических свойств клетчатки. Скорость мономолекулярной реакции определяется уравнением

$$dN/dt = -cN, \qquad (10.10)$$

где N — концентрация реагирующего вещества; c — константа скорости реакции, представляющая скорость реакции при концентрации реагирующих веществ, равной единице.

В данном случае N представляет степень полимеризации клетчатки. Если при $t=0$ $N=N_0$, т. е. начальная степень полимеризации, то из (10.10) находим

$$N = N_0 \exp(-ct). \qquad (10.11)$$

Количество распавшихся к моменту времени t молекул

$$\Delta N = N_0 - N = N_0\left[1 - \exp(-ct)\right]. \qquad (10.12)$$

Константа скорости реакции c связана с абсолютной температурой T соотношением Аррениуса

$$d \ln c/dT = W_a/RT^2, \qquad (10.13)$$

где W_a — энергия активации; R — универсальная газовая постоянная.

Отношение $W_a/R = b$ для условий силового конденсатора может считаться постоянным. После его подстановки в (10.13) и последующего интегрирования найдем

$$c = B\exp(-b/T), \qquad (10.14)$$

где B — постоянная, характеризующая особенности данной реакции. Теперь окончательная формула будет иметь вид

$$N = N_0 \exp[-Bt \exp -b/T]. \qquad (10.15)$$

Поделим обе части (10.15) на N_0 и обозначим $N/N_0 = \nu\ (0 \leqslant \nu \leqslant 1)$, которое назовем относительной степенью полимеризации, тогда

$$\nu = \exp[-Bt \exp(-b/T)]. \qquad (10.16)$$

При $T = \text{const}$ величина ν экспоненциально зависит от времени. На рис. 10.8 приведены экспериментальные кривые $\nu = \nu(t)$ [5.4], которые также являются экспонентами. Логарифмирование (10.16) дает

$$\ln \nu = -Bt \exp(-b/T). \qquad (10.17)$$

При $T = \text{const}$ также $B\exp(-b/T) = \text{const}$, и формула (10.17) является уравнением прямой. Логарифмируя ее еще раз, получаем

$$\ln\ln \nu^{-1} = \ln B + \ln t - b/T. \qquad (10.18)$$

Задаваясь некоторым значением $\nu = \nu_1$ и учитывая, что $B = \text{const}$, из (10.18) находим связь между температурой диэлектрика и временем, в течение которого может быть достигнуто заданное значение ν_1. Если задать предельно допустимое значение снижения степени полимеризации клетчатки, то (10.18) будет выражать связь между ресурсом изоляции и ее температурой:

$$\ln t = \ln(\ln \nu^{-1}/B) + b/T. \qquad (10.19)$$

Учитывая, что $\ln(\ln \nu^{-1}/B) = \text{const} = H$, имеем

$$\ln t = H + b/T. \qquad (10.20)$$

Как видно из (10.20), логарифм ресурса является линейной функцией обратного значения абсолютной температуры диэлектрика. Переходя в (10.20) к температуре Θ по Цельсию ($\Theta \leqslant 100°$ С), получаем

$$\ln t = H' - m\Theta, \qquad (10.21)$$

где $H' = H + b/T_0$; $m = b/T_0^2$; T_0 — окружающая температура, К.

На рис. 10.9 [5.4] приведены полученные экспериментально графики, выражающие зависимость времени достижения данной относительной степени полимеризации от температуры. Они

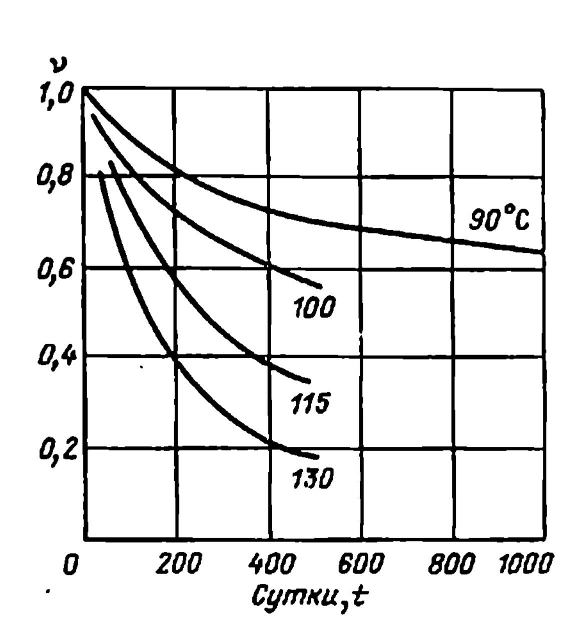
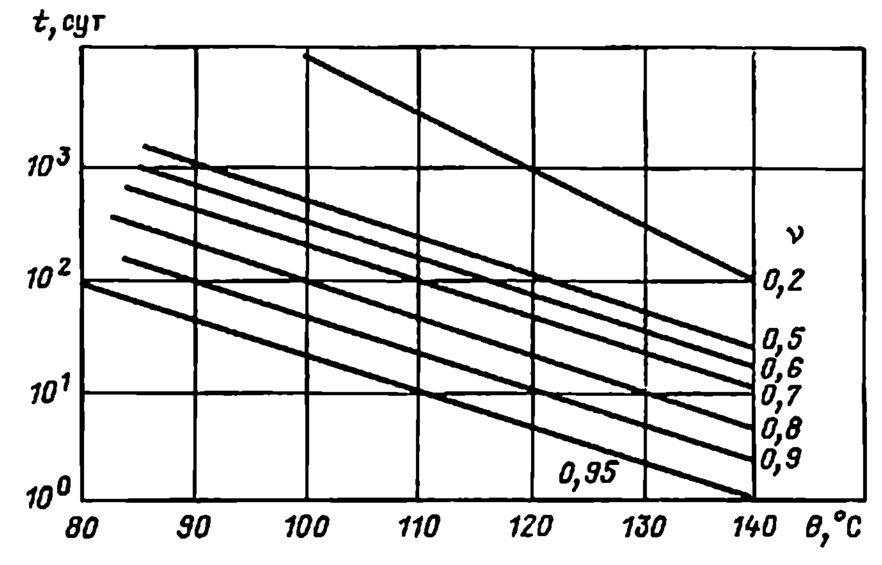


Рис. 10.8. Изменение относительной степени полимеризации во времени при различных температурах

Рис. 10.9. Зависимость времени достижения заданной степени полимеризации от температуры



представляют прямые линии и по своему характеру согласуются с теоретическими зависимостями, описываемыми формулой (10.21). Закономерность, выражаемая (10.21), в свою очередь, совпадает с экспериментальной закономерностью, полученной ранее при исследовании лакотканей, в которой H' и m предполагались постоянными и из которой следует, что при изменении температуры на $\Delta\Theta = 10°$ С ресурс изменяется вдвое. Эта закономерность известна как «правило десяти градусов». Исследования [5.5] показали, что значение $\Delta\Theta$, вдвое изменяющее ресурс клетчатки, есть функция степени ее полимеризации и лежит в пределах от 5 до 10° С, как это показано на рис. 10.10. Этим объясняются различные значения $\Delta\Theta$, полученные ранее экспериментально. На рис. 10.11 [5.6] приведена зависимость отношения дипольного максимума $\operatorname{tg}\delta$ клетчатки (под которым понимается наибольшее значение $\operatorname{tg}\delta$

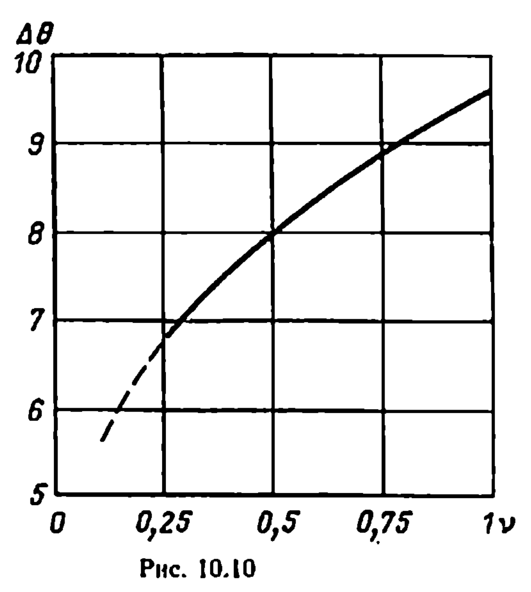


Рис. 10.10

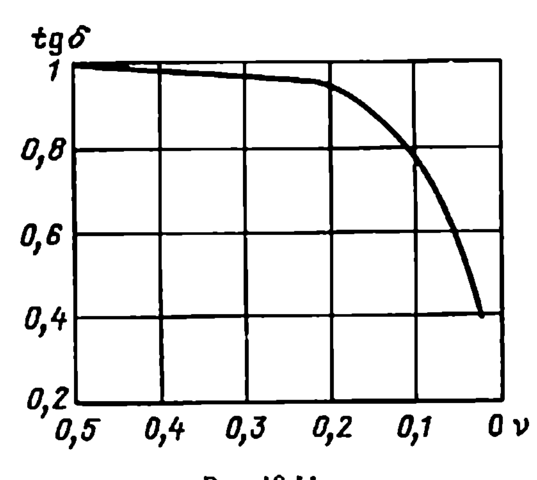


Рис. 10.11

Рис. 10.10. Зависимость температуры, вдвое изменяющей ресурс клетчатки, от относительной степени полимеризации

Рис. 10.11. Зависимость максимума tgδ клетчатки от относительной степени полимеризации $tg\delta_* = tg\delta_\nu / tg\delta_{\nu-1}$

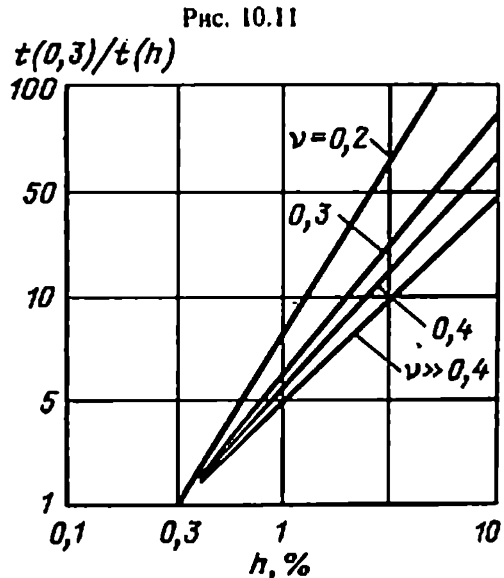


Рис. 10.12. Влияние влажности *h* на время достижения заданной степени полимеризации

в его зависимости от температуры) при данной относительной степени полимеризации к дипольному максимуму tg δ, соответствующему ν = 1. Заметное изменение дипольного максимума tg δ наступает только при очень низкой степени полимеризации, равной или меньшей 150.

Время, необходимое для достижения степени полимеризации ν = 150 при термическом старении в вакууме при начальной влажности 0,03%, составляет:

Θ, °C	80	85	90	95	100	105	110	115
Количество лет	1200	650	350	180	35	50	28	14

Наличие влаги и кислорода может существенно ускорить процесс деструкции клетчатки. Так, бумага, работающая в условиях свободного доступа кислорода воздуха, старится в 2,5 раза быстрее, чем при работе без доступа кислорода. В диапазоне влагосодержания бумаги 0,3—0,7% для не очень малых значений конечной степени полимеризации (500—600) скорость

термической деструкции приближенно может считаться пропорциональной содержанию влаги. При более высокой степени полимеризации влияние влаги усиливается (рис. 10.12). На рис. 10.12 по оси абсцисс отложено отношение времени достижения заданной относительной степени полимеризации v при влажности 0,3% ко времени достижения той же степени полимеризации при влажности h, %. В процессе деструкции клетчатки происходит выделение воды, количество которой увеличивается с понижением степени полимеризации.

10.4. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ СТАРЕНИЕ

Интенсивность разрушения при электрохимическом старении зависит от тока утечки или ионного тока через диэлектрик. С увеличением ионного тока интенсивность разрушения возрастает. Температурную зависимость ионного тока в конденсаторном диэлектрике можно представить общей формулой

$$I_и = A_{и1} \exp(-b_э/T), \quad (10.22)$$

в которой $A_{и1}$ и $b_э$ — постоянные.

В первом приближении зависимость ионного тока в конденсаторном диэлектрике от напряженности E можно представить в виде

$$I_и = A_{и2} E^{a_э}, \quad (10.23а)$$

где $A_{и2}$ и $a_э$ — константы.

На основании (10.22) и (10.23а) обобщенную зависимость ионного тока в конденсаторном диэлектрике от температуры и напряженности можно представить в форме

$$I_и = A_{и3} E^{a_э} \exp(-b_э/T), \quad (10.23б)$$

и соответствующая ему интенсивность разрушения

$$c_э = A_э E^{a_э} \exp(-b_э/T), \quad (10.23в)$$

при этом зависимость ресурса при электрохимическом старении от напряженности и температуры будет выражаться формулой, аналогичной (10.9):

$$\tau = \tau_0 (E_0/E)^{a_э} \left[b_э \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]. \quad (10.24)$$

Электролитическое разложение углеводородных соединений в присутствии остаточной влаги может привести к образованию пузырьков газа и возникновению в изоляции ЧР. Кроме того, атомарный водород может способствовать процессам гидрогенизации, а атомарный кислород — окислительным процессам. И тот, и другой процессы ухудшают диэлектрические свойства изоляции и приводят к возрастанию $\text{tg}\,\delta$ и проводимости

диэлектрика. В конденсаторах, пропитанных хлорированными жидкостями, образующиеся в процессе электролиза атомы водорода и хлора реагируют друг с другом, образуя хлористый водород, разрушительно действующий на клетчатку и алюминиевые обкладки. Образующийся при этом хлористый алюминий $Al\ Cl_3$ разрушает обкладки и, являясь активным катализатором, способствует дальнейшему разложению хлорированных жидкостей. Добавкой антрахинона могут быть существенно ослаблены эти разрушающие процессы в пропитанном хлорированными жидкостями диэлектрике, работающем на постоянном напряжении. Это объясняется тем, что антрахинон связывает свободные атомы водорода и хлора, обрывая возникающие химические реакции. Окислительные процессы могут привести к образованию воды, способствующей электролитическому разрушению изоляции.

При пропитке касторовым маслом на обкладках (преимущественно на анодной) под длительным воздействием постоянного напряжения образуется твердая пленка, обладающая высоким удельным сопротивлением, благодаря которой уменьшается ионный ток и возрастает электрическая прочность прослоек свободной жидкости у обкладок, что снижает скорость старения изоляции. В конденсаторах с диэлектриком из неполярных пленок ток утечки мал и процессы электрохимического старения практически отсутствуют. В конденсаторах с диэлектриком из полярных пленок возможно возникновение гидролизного разрушения. При разложении триацетатной пленки под воздействием постоянного напряжения и повышенной температуры выделяется уксусная кислота.

10.5. ОЦЕНКА РЕСУРСА СИЛОВОГО КОНДЕНСАТОРА

Оптимальные технико-экономические и эксплуатационные характеристики конденсатора определяются оптимальным соотношением между ресурсом изоляции и режимом ее работы. Ресурс подавляющего большинства конденсаторов оценивается временем его работы до наступления отказа, для импульсных конденсаторов — числом зарядно-разрядных циклов. Как показывают исследования и мировой опыт эксплуатации, оптимальный ресурс конденсаторов для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты должен составлять 20—30 лет для 90% продукции. Обычно принимается ресурс в 20 лет. Как видно из изложенного выше, аналитический расчет ресурса практически трудно осуществим, поэтому ресурсные испытания и опыт эксплуатации являются основными источниками информации о нем.

Проведение ресурсных испытаний в номинальном режиме при ожидаемом ресурсе в 20 лет не дает возможности быстрого

получения результатов. Поэтому при ресурсных исследованиях силовых конденсаторов прибегают к ускоренным испытаниям, под которыми понимаются испытания в форсированном режиме, т. е. при повышенных против номинальных значениях напряженности поля, температуры и в ряде случаев частоты. Степень форсирования (увеличение напряженности, температуры и частоты) должна выбираться такой, чтобы сохранилось физическое подобие процессов старения в диэлектрике. Это требование является обязательным. Полученные при форсированных испытаниях наработки должны быть приведены к номинальному режиму, для чего используются эмпирические соотношения, связывающие ресурс изоляции с режимом ее работы.

Многочисленные исследования показывают, что зависимость ресурса изоляции от напряженности поля может быть представлена соотношением

$$\tau = AE^{-a}, \tag{10.25}$$

где показатель степени a зависит от рода воздействующего напряжения, напряженности, толщины диэлектрика, вида изоляции, технологии изготовления.

Обычно для переменного напряжения $a = 5 \div 9$, а для постоянного $a = 8 \div 14$.

Формула (10.25) очень близка выражению (10.5). Зависимость ресурса от температуры достаточно хорошо описывается на основе закона Аррениуса. Исходя из этих предпосылок, рекомендуется для пересчета следующая формула, аналогичная (10.9) и (10.14):

$$\tau = \tau_0 (E_0/E)^a \exp\left[b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right], \tag{10.26}$$

где τ_0 — ресурс изоляции при температуре T_0 и напряженности E_0.

Для ограниченного диапазона температур (10.26) может быть представлена в виде

$$\tau = \tau_0 (E_0/E)^a \exp(-b\Delta\Theta), \tag{10.27}$$

где $\Delta\Theta = \Theta - \Theta_0$.

Величины T или Θ и T_0 или Θ_0 представляют температуры наиболее нагретых точек конденсатора. Для расчета ресурса конденсатора с бумажно-хлордифениловым диэлектриком, длительно работающего на переменном напряжении частотой 50—60 Гц, в [10.7] предложена формула

$$\tau = A/(E\Theta)^{7.7}, \tag{10.28}$$

где Θ — температура наиболее нагретой точки конденсатора, °С.

Эта формула получила довольно широкое распространение в практике.

Для бумажно-пленочного диэлектрика, работающего в тех же условиях, что и выше, рекомендуется формула, аналогичная приведенной выше:

$$\tau = A_1/(E\Theta)^{9,4}. \qquad (10.29)$$

Формулы (10.28) и (10.29) позволяют при известных A и A_1 не только производить оценку ресурса при проектировании конденсатора, но также экспериментально оценивать ресурс по результатам форсированных испытаний с помощью соотношения

$$\tau_{н} = \tau_{и} (E_{и}\Theta_{и}/E_{ном}\Theta_{ном})^{a}, \qquad (10.30)$$

где индексом «ном» обозначены величины, относящиеся к номинальному и индексом «и» — к форсированному испытательному режимам; $a = 7{,}7$ или $a = 9{,}4$ в зависимости от того, для какого диэлектрика производится пересчет.

При пользовании эмпирическими формулами следует иметь в виду, что они применимы только к тому диэлектрику, для которого они получены, и только в строго определенном диапазоне изменения параметров. Применение их к другому диэлектрику и выход за пределы изменения параметров, для которых они получены, приводят к неправильным результатам. Применительно к формулам (10.28) и (10.29) это означает, что они справедливы в диапазоне изменения напряженностей, при которых не возникает критических ЧР, и в диапазоне температур, при которых не возникает термическая неустойчивость в конденсаторах с бумажным диэлектриком и деформация или плавление пленки в конденсаторах с бумажно-пленочным диэлектриком.

Как указывалось в гл. 9, уменьшение плотности бумаги, приводящее к уменьшению кратковременной электрической прочности изоляции, увеличивает напряжение возникновения ЧР вследствие уменьшения напряженности в прослойках жидкого диэлектрика, если его диэлектрическая проницаемость меньше диэлектрической проницаемости клетчатки. Это увеличивает ресурс конденсаторов с изоляцией из бумаги с пониженной плотностью. На рис. 10.13 представлена зависимость среднего ресурса бумажно-масляных секций от плотности бумаги, иллюстрирующая это положение [10.9]. Уменьшение толщины диэлектрика секции приводит к увеличению напряженности ЧР и замедлению процессов электрического старения при заданных рабочих напряженностях или повышению рабочих напряженностей при заданном ресурсе. Это проявляется также в увеличении показателя a с уменьшением толщины диэлектрика (рис. 10.14).

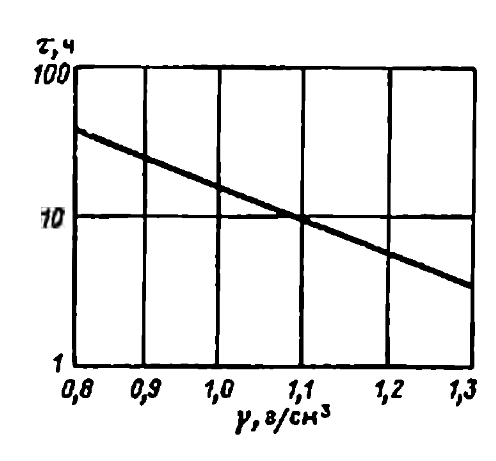
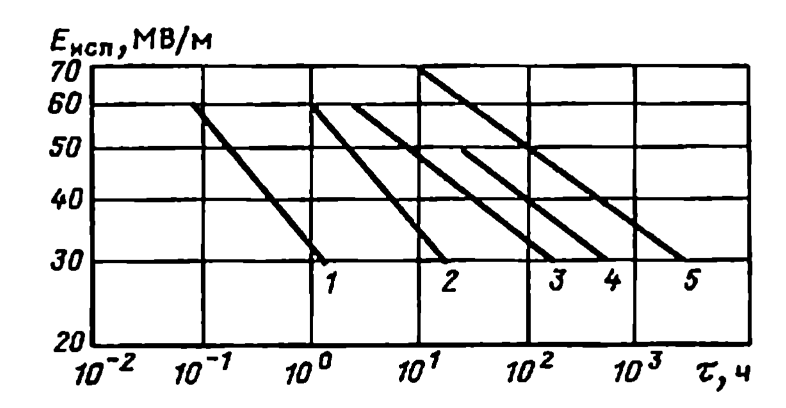


Рис. 10.13. Влияние плотности конденсаторной бумаги на средний ресурс бумажно-масляных секций ($d_с = 6 \times 12$ мкм, $E = 50$ МВ/м)

Рис. 10.14. Влияние испытательной напряженности на ресурс секций с различной толщиной диэлектрика:
1 — 7×12; *2* — 6×12; *3* — 5×12; *4* — 4×12; *5* — 3×12 мкм



В [10.8] предложена формула, связывающая ресурс бумажно-масляных конденсаторов τ(с) с напряженностью E (МВ/м), частотой f(Гц), толщиной диэлектрика $d_с$ (мкм), температурой Θ (°С), удельным газовыделением нефтяного масла B (см³/Дж), исходным газосодержанием пропитывающего состава $H_г$ (% по объему), плотностью бумаги γ (г/м³):

$$\tau = \frac{c \cdot 10^{(g - b\Theta)}}{E^a f^l d_с^m B^p \gamma^k H_г^n}, \tag{10.31}$$

где c — постоянная, зависящая от условий испытания; $g = 10$; $b = 0{,}1$; $l = 0{,}8$; $k = 5 \div 6$; $p = 0{,}7$; $a = 11{,}6 - 0{,}0856 d_с$; $m = 10 - 0{,}1E$.

Для бумажно-трихлордифениловой изоляции $g = 6{,}11$, $b = 0{,}0357$.

Так как процессы старения при напряженностях, близких к рабочим (кроме процессов окисления), связаны с развитием начальных ЧР, то в соответствии с (10.5) можно предположить, что ресурс изоляции обратно пропорционален мощности начальных ЧР, при этом для изоляции, пропитанной нефтяным маслом, можно считать, что ресурс определяется временем, необходимым для образования газовых пузырьков, после появления которых напряжение ЧР сильно снижается, появля-

ются критические ЧР, резко возрастает интенсивность (мощность) ЧР и происходит быстрое разрушение изоляции. В этом случае ресурс изоляции выражается формулой (9.30). Так как обычно $v \ll \beta V$, то

$$\tau \approx V/v. \tag{10.32}$$

Учитывая (9.22) и (9.23), имеем

$$\tau = C_{\text{г}} V_{\text{ж}}/(BP_{\text{чр}}). \tag{10.33}$$

В этой формуле зависимость $P_{\text{чр}}$ от напряженности для переменного напряжения выражается формулой (9.19), а для постоянного — (9.57), при этом

$$\tau = C_{\text{г}} V_{\text{ж}}/(BA_2E^a) = AE^{-a}, \tag{10.34}$$

где для переменного напряжения промышленной частоты $a = 5 \div 7$, а для постоянного напряжения $a = 8 \div 14$.

Формула (10.24) для переменного и постоянного напряжений достаточно хорошо соответствует экспериментально полученным зависимостям.

В конденсаторах, пропитанных трихлордифенилом, вследствие значительно большей газостойкости пропитывающей жидкости газовыделение в процессе старения происходит в существенно меньшей степени. В этом случае ресурс обычно определяется энергией ЧР W_0, необходимой для разрушения твердой фазы изоляции или для повышения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции до значения, соответствующего нарушению тепловой устойчивости данного типа конденсаторов. Значения W_0 могут быть установлены на основании ускоренных ресурсных испытаний конденсаторов при регистрации характеристик ЧР в процессе этих испытаний:

$$W_0 = \int_0^{\tau} P_{\text{чр}} dt. \tag{10.35}$$

Если ресурс конденсатора определяется условиями выхода конденсатора из теплового равновесия, то для расчета ресурса конденсаторов с пропиткой хлордифенилами необходимо знать зависимость $\operatorname{tg}\delta$ изоляции от энергии ЧР, выделяемой в конденсаторах. Эти зависимости могут быть установлены экспериментально. Зная предельно допустимые значения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции, можно на основании этих зависимостей определить энергию ЧР W_0, затраченную на повышение $\operatorname{tg}\delta$ изоляции до значения, соответствующего нарушению тепловой устойчивости данного типа конденсаторов. Предельно допустимые значения $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторов при рабочих напряженностях могут быть рассчитаны на основании теплового расчета (см. гл. 14).

Если известно значение W_0, то ресурс конденсатора

$$\tau = W_0/P_{\text{чр}}. \tag{10.36}$$

Учитывая зависимость мощности ЧР $P_{чр}$ от напряженности электрического поля в соответствии с (9.19), можно получить зависимость ресурса конденсатора от напряженности электрического поля:

$$\tau = \frac{W_0}{A_2 E^a} = AE^{-a}. \qquad (10.37)$$

В [10.9, 10.10] предложен аналогичный подход к оценке ресурса конденсатора, при этом, однако, предполагается, что разложение жидкого диэлектрика происходит преимущественно у поверхности электродов или между слоями бумаги или пленки под действием энергии перезаряда частиц или ионов, участвующих в катафоретической или ионной проводимости жидких диэлектриков. Как было показано, часть частиц, приближаясь к электроду или поверхности бумаги или пленки, перезаряжается, что сопровождается световым импульсом, т. е. пробоем прослойки жидкости (частичным зарядом), разложением жидкости с выделением газа и твердого углерода. Количество выделившегося газа в жидком диэлектрике определяется энергией перезаряда частиц, т. е. энергией ЧР $W_{чр}$, которая возрастает пропорционально напряженности в прослойке жидкого диэлектрика $E_ж$, числу перезарядов и заряду частиц, которыми определяется ток в прослойке жидкого диэлектрика $I_ж$. В расчете на единицу площади электродов мощность ЧР в прослойке жидкости

$$P_{чр.уд\,s} = kE_ж J_ж d_ж = kE_ж^2 \gamma_ж d_ж, \qquad (10.38)$$

где k — коэффициент пропорциональности; $\gamma_ж$ — удельная проводимость жидкости; $d_ж$ — толщина прослойки жидкости; $P_{чр.уд\,s}$ — мощность ЧР в прослойке жидкости на единицу площади электродов; $J_ж$ — плотность тока в прослойке жидкости.

Зависимость $\gamma_ж$ от напряженности $E_ж$ и температуры Θ определяется выражением

$$\gamma_ж = \gamma_{ж0} \exp\left[\alpha_ж(\Theta - \Theta_0) + \beta_ж(E_ж - E_{ж0})\right], \qquad (10.39)$$

где $\gamma_{ж0}$ — удельная проводимость жидкости при Θ_0 и $E_{ж0}$; $\alpha_ж$ — температурный коэффициент удельной проводимости; $\beta_ж$ — коэффициент, определяющий зависимость $\gamma_ж(E_ж)$.

Формула справедлива при $\Theta > \Theta_0$ и $E_ж > E_{ж0}$.

Для маловязких жидкостей, в которых диэлектрические потери определяются потерями проводимости, имеем

$$\operatorname{tg}\delta_ж = \gamma_ж/(\omega\varepsilon_{aж}) = \operatorname{tg}\delta_{ж0} \exp\left[\alpha_ж(\Theta - \Theta_0) + \beta_ж(E_ж - E_{ж0})\right], \qquad (10.40)$$

и тогда

$$P_{чр.уд\,s} = kE_ж^2 \omega\varepsilon_{aж} \operatorname{tg}\delta_ж d_ж = kE_ж^2 \omega\varepsilon_{aж} \operatorname{tg}\delta_{ж0} d_ж \exp\left[\alpha_ж(\Theta - \Theta_0) + \beta_ж(E_ж - E_{ж0})\right]. \qquad (10.41)$$

Так же, как и применительно к (10.5) и (10.35), можно считать, что мощность $P_{чр}$ в течение срока службы изменяется незначительно, заметно возрастая только непосредственно перед пробоем, и пробой происходит, когда энергия, необходимая для разрушения изоляции или для нарушения тепловой устойчивости конденсатора за счет повышения $\operatorname{tg}\delta$, остается неизменной и равной W_0. Значение W_0 для конкретного типа конденсаторов можно определить на основании ускоренных ресурсных испытаний при повышенной напряженности $E_и$. Если при $E_и$ и $\omega_и$ ресурс конденсатора равен $\tau_и$, то

$$W_{0\,удs}=P_{чр.уд\,s}\tau_и=\tau_и k E^2_{ж.и}\omega_и\varepsilon_{aж}\operatorname{tg}\delta_{ж0}d_ж\times$$
$$\times\exp\left[\alpha_ж(\Theta-\Theta_0)+\beta_ж(E_{ж.и}-E_{ж0})\right], \qquad (10.42)$$

где $W_{0\,удs}$ — значение W_0 в прослойке жидкости, отнесенное к единице площади электродов.

На основании (10.42) имеем для ресурса в рабочем режиме при $E_{ж.р}$, $\omega_р$ и $\Theta_р$

$$\tau_р=\frac{\tau_и\omega_и E^2_{ж.и}\exp\left[\alpha_ж(\Theta_и-\Theta_0)+\beta_ж(E_{ж.и}-E_{ж0})\right]}{\omega_р E^2_{ж.р}\exp\left[\alpha_ж(\Theta_р-\Theta_0)+\beta_ж(E_{ж.р}-E_{ж0})\right]}. \qquad (10.43)$$

Введем обозначение

$$M=\frac{W_{0\,удs}}{kd_ж\varepsilon_{aж}\operatorname{tg}\delta_{ж0}}=\tau_и\omega_и E^2_и\exp\left[\alpha_ж(\Theta_и-\Theta_0)+\beta_ж(E_{ж.и}-E_{ж0})\right]. \qquad (10.44)$$

Тогда

$$\tau_р=\frac{M}{\omega_р E^2_{ж.р}\exp\left[\alpha_ж(\Theta_р-\Theta_0)+\beta_ж(E_{ж.р}-E_{ж0})\right]}. \qquad (10.45)$$

Из (10.42) и (10.44) можно получить:

$$M=W_{0\,удs}/(kd_ж\varepsilon_{aж}\operatorname{tg}\delta_{ж0})=W_{0\,удv}/(k\varepsilon_{aж}\operatorname{tg}\delta_{ж0}), \qquad (10.46)$$

где $W_{0\,удv}$ — энергия разрушения единицы объема пропитывающей жидкости.

Из (10.45) и (10.46) следует, что значение M и соответственно ресурс $\tau_р$ существенно зависят от $\operatorname{tg}\delta_{ж0}$ жидкого диэлектрика, возрастая с уменьшением $\operatorname{tg}\delta_{ж0}$.

Коэффициенты в (10.39) принимают следующие значения: для конденсаторного масла $\alpha_ж=0{,}03$ 1/°C и $\beta_ж=0{,}138$ м/МВ, для трихлордифенила $\alpha_ж=0{,}043$ 1/°C и $\beta_ж=0{,}097$ м/МВ, при этом $E_{ж0}=10$ МВ/м и $\Theta_0=0$° C. Для конденсаторов с пропиткой трихлордифенилом для испытаний при промышленной частоте значения M лежат в пределах $(1-3)\cdot10^{11}$ В²/м².

В [10.11] также указывается на тесную связь между ресурсом каждого конкретного конденсатора и его $\operatorname{tg}\delta$:

$$\tau=\frac{A}{U^{a_1}(C\operatorname{tg}\delta)^{a_2}}, \qquad (10.47)$$

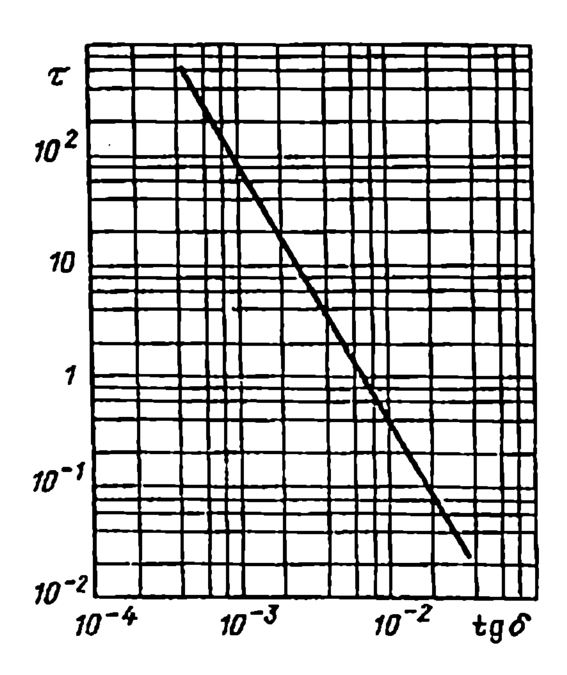


Рис. 10.15. Зависимость ресурса (относительные единицы) от tgδ конденсаторов с полипропиленовым диэлектриком, пропитанным жидкостью «Южилек С 101»

где C — емкость конденсатора при 20° С; tg δ — при 90° С; для конденсаторов типов КС2-6, 3-75 коэффициенты имеют следующие значения: $a_1 = 13{,}7$; $a_2 = 16{,}35 \lg U - 10{,}58$; $A = 10^{-16{,}64}$. Единицы измерения: U — В, C — Ф, τ — с.

Четкая корреляционная зависимость между ресурсом конденсаторов и tg δ изоляции (рис. 10.15) установлена в [10.12]. Рост tg δ изоляции приводит к существенному снижению ресурса конденсаторов, что качественно хорошо соответствует выражениям (10.45) и (10.47).

В [10.13] для прогнозирования ресурса высоковольтных конденсаторов с органическим диэлектриком предлагается следующая формула, основанная на кинетической теории разрушения материала при длительных воздействиях:

$$\tau = \tau_0 \exp\left[(\alpha_1 - \alpha_2 K_{н})/(kT)\right], \qquad (10.48)$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура, К; для интервала температур до 100° С $\alpha_1 = 0{,}48$ эВ $= 7{,}7 \cdot 10^{-20}$ Дж и $\alpha_2 = 0{,}23$ эВ $= 3{,}7 \cdot 10^{-20}$ Дж; $K_{н} = U/U_0$; τ_0 — ресурс при напряжении U_0.

Для ускоренных ресурсных испытаний может быть использована также методика ступенчатого подъема напряжения с выдержкой на каждой i-й ступени в течение определенного интервала времени Δt_i, при этом время воздействия на i-й ступени напряженности E_i приводится ко времени воздействия напряженности E_1 по формуле

$$\tau_1 = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i (E_i/E_1)^a, \qquad (10.49)$$

где a — показатель степени в зависимости τ от E_i; τ_1 — расчетный ресурс при неизменной напряженности E_1; Δt_i — продолжительность испытаний на i-й ступени при напряженности E_i; Δt_n — время до пробоя на последней, n-й ступени при напряженности E_n $(E_1 < E_2 < \ldots < E_i < \ldots < E_n)$ [10.14].

Однако предполагаемая методика может быть использована лишь в том случае, если на всех ступенях напряжения сохранятся основные физические закономерности старения,

например не возникает перехода начальных ЧР в критические. В ряде случаев такое изменение физических процессов старения наблюдается на последних ступенях старения, что делает неправомочным использование формулы (10.49) и приводит к ошибочным результатам оценки ресурса испытуемых конденсаторов.

Значения испытательных напряженностей для ускоренных испытаний на ресурс, при которых, с одной стороны, сохраняется физика старения изоляции и, с другой стороны, происходит достаточная интенсификация процессов старения, могут быть установлены на основании ресурсных испытаний при ступенчатом подъеме напряжения с ограничением верхней ступени [10.15]. Так, например, для пленочной толщиной 24—32 мкм и пленочно-бумажной толщиной 35 мкм изоляций испытательные напряженности для ускоренных ресурсных испытаний целесообразно принимать равными (1,4—1,8) $E_{ном}$. Эти значения ниже, чем напряженности критических ЧР: $E_{кр}=(2\div 2,5)\,E_{ном}$.

В процессе работы в изоляции конденсаторов, пропитанных даже газостойкими жидкостями, в той или иной степени возникает разложение жидкого диэлектрика с выделением газов. Анализ концентрации растворенных газов в жидком диэлектрике методом газовой хроматографии в процессе работы конденсатора в ряде случаев позволяет оценивать интенсивность старения, состояние изоляции, а в ряде случаев и определять конденсаторы с наименьшим ожидаемым ресурсом [10.16]. Эксперименты, проведенные на импульсных конденсаторах с пропиткой касторовым маслом, показали, что в работающем конденсаторе почти мгновенно регистрируются характерные газы (H_2, CH_4, CO, CO_2, C_2H_4, C_2H_6, C_2H_2), концентрация которых по мере наработки ресурса нарастает. Последовательность выхода из строя конденсаторов находилась в соответствии со скоростью нарастания концентрации газов. Интересно отметить, что, так же как и для силовых трансформаторов, наиболее информативным о существенных процессах старения изоляции является ацетилен C_2H_2.

При работе конденсаторов на постоянном напряжении зависимость, связывающая их ресурс с напряженностью E и температурой Θ, аналогична зависимости (10.27), но с другими значениями τ_0, b и a. Для пересчета ресурса конденсатора, работающего на постоянном напряжении, от одного режима к другому, например от испытательного $U_{и}$ к номинальному $U_{ном}$, можно пользоваться формулой, аналогичной (10.26). Для ограниченного диапазона температур может быть использована формула

$$\tau_{ном}=\tau_{и}\left(U_{и}/U_{ном}\right)^{n} 2^{(\Theta_{и}-\Theta_{ном})/a}. \qquad (10.50)$$

Для бумажного диэлектрика $a=8\div14$; $n=10$.

Пересчет ресурса конденсатора с мягкими обкладками и однослойным диэлектриком из полипропиленовой пленки от одного режима к другому производится по формуле, аналогичной формуле (10.50), имеющей вид

$$\tau_{\text{ном}}=\tau_{\text{и}}\left(U_{\text{и}}/U_{\text{ном}}\right)^{8}2^{(\Theta_{\text{и}}-\Theta_{\text{ном}})/7}. \qquad (10.51)$$

Значения с индексом «ном» относятся к номинальному режиму, а с индексом «и» — к испытательному, при котором определяется ресурс. Номинальный ресурс таких конденсаторов составляет 10^5 ч, или 10 лет. Для оценки ресурса предложенными формулами можно пользоваться лишь в определенных диапазонах изменения параметров, входящих в формулы (напряженность электрического поля, температура). Применительно к напряженности это обычно соответствует области повышенных значений до 1,6—1,8 $E_р$.

10.6. НАДЕЖНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

Под надежностью изделия понимается его свойство выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации в течение требуемого промежутка времени, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах. Она обеспечивается ремонтопригодностью, безотказностью, сохраняемостью и долговечностью его элементов. В применении к силовым конденсаторам это определение несколько упрощается. Силовые конденсаторы относятся к неремонтируемым изделиям, работающим до первого отказа, поэтому требование о ремонтопригодности отпадает. При хранении в надлежащих условиях сохраняемость силового конденсатора высокая, и она практически не оказывает влияния на его надежность. Надежность силового конденсатора определяется только его долговечностью и безотказностью. Долговечность и безотказность — это свойства, практически неразделимые в применении к силовому конденсатору. Они описываются одной и той же функцией распределения, следовательно, каждое из этих свойств независимо определяет надежность. Прекращение конденсатором выполнения своих функций вследствие возникновения в нем дефектов (пробой и т. д.) или изменение его параметров сверх допустимых значений, при которых происходит нарушение нормальной работы устройства, в котором он установлен, называется его отказом. Отказы конденсаторов делятся на случайные, причины возникновения которых носят чисто случайный характер, и отказы, возникающие вследствие старения и износа диэлектрика. В обоих случаях время, прошедшее с момента включения до момента наступления отказа, является случайной величиной. Несмотря на большое количество типов, конструктивных особенностей, режимов и условий работы и т. д.,

силовые конденсаторы имеют ряд общих свойств с точки зрения исследования их надежности.

Количественно надежность изделия характеризуется совокупностью признаков, называемых показателями надежности. Аналитический расчет показателей надежности конденсаторов практически неосуществим, поэтому ускоренные ресурсные испытания и опыт эксплуатации являются основными источниками информации об их надежности. Испытания, как правило, должны производиться в форсированном режиме с последующим пересчетом результатов к номинальному режиму. Основой для оценки надежности конденсаторов по выборочным данным является закон распределения ресурса.

Наиболее общим показателем надежности силовых конденсаторов является вероятность безотказной работы $p(t)$ в течение времени, соответствующем его ресурсу или сроку службы t. Использование функции $p(t)$ в качестве единого контролируемого показателя надежности вместо любых других особенно удобно потому, что контроль $p(t)$ при фиксированном t производится совершенно одинаково для любых законов распределения времени безотказной работы. На основании вышеизложенного у конденсаторов для повышения коэффициента мощности обычно принимается $p \geqslant 0{,}9$ при $t \geqslant 20$ лет. Эти значения могут быть приняты в качестве критерия при проведении контрольных испытаний на надежность текущей продукции.

Опыт показывает, что различные образцы одного и того же типа конденсатора, изготовленные в идентичных условиях, обладают различной надежностью, установить которую для каждого индивидуального образца невозможно ввиду того, что на одном конденсаторе может быть получена только одна реализация случайной величины. Поэтому объектом испытаний на надежность является целая партия. Устанавливаемое в результате испытаний значение показателя надежности относится ко всей партии, т. е. к каждому входящему в партию образцу, при этом все образцы партии полагаются равнонадежными. Хотя различия в свойствах надежности отдельных образцов конденсаторов одного и того же типа не могут быть установлены, это не является доказательством того, что этих различий вообще нет. Обозначим плотность распределения вероятности возникновения отказа (или дифференциальную функцию распределения) образцов через $f(t)$. Тогда вероятность безотказной работы $p(t)$ на протяжении фиксированного отрезка времени

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(t)\,dt. \qquad (10.52)$$

Задачи, решаемые при испытаниях на надежность, могут быть двоякими. В одних случаях требуется определить

неизвестные числовые показатели надежности, влияние на них изменения различных факторов и т. п. Такие испытания носят исследовательский характер и называются определительными. В других случаях необходимо проверить соответствие показателей надежности данной конкретной партии изделий требованиям нормативно-технической документации. Такие испытания называются контрольными. Различия в целях испытаний обусловливают и различия в методах их планирования и проведения, обработки данных. При оценке надежности силовых конденсаторов полностью применимы общие положения теории надежности с учетом их специфики. Испытания могут проводиться методами однократной или двукратной выборок. Метод однократной выборки применим при первичной оценке надежности изделий с любым уровнем надежности или неизвестным законом распределения отказов. Метод двукратной выборки обычно применяется для оценки надежности изделий с минимальным уровнем надежности $p_{min} \geqslant 0,9$. В ряде случаев метод двукратной выборки может дать экономию в количестве испытуемых изделий, не снизив достоверности результатов.

Количество подлежащих испытанию конденсаторов зависит от ряда факторов: требуемого уровня надежности, рисков изготовителя и заказчика, приемочного числа (количество допускаемых отказов при испытании) и т. д. Для определения объема выборки для испытаний существуют специальные таблицы. Если принять приведенные выше показатели надежности конденсаторов для повышения коэффициента мощности за контрольные, то при испытаниях по методу однократной выборки для приемочного числа, равного нулю, объем выборки

$$N = \lg(1 - p^*)/\lg(1 - q), \qquad (10.53)$$

где q — допустимая доля отказов конденсаторов к концу выработки ресурса; в нашем случае $q = 0,1$; p^* — вероятность того, что $q \leqslant 0,1$; обычно $p^* = 0,9$.

Длительность испытаний определяется из соотношений, связывающих ресурс конденсатора с режимом его работы. При выборе режима ускоренных испытаний прежде всего следует обеспечить физическое подобие процессов в форсированном и нормальном режимах. Если не будет соблюдено это условие, то картина нормального старения будет искажена. В то же время испытания при выбранном режиме не должны продолжаться слишком долго, поскольку они могут потерять свою актуальность. Для конденсаторов промышленной частоты испытательная надежность $E_и$ обычно выбирается в пределах от 1,3 до $1,8\,E_{ном}$, при котором конденсатор выдерживается в течение испытательного времени или до пробоя.

Кроме испытании длительным воздействием повышенного напряжения для конденсаторов промышленной частоты производятся испытания кратковременными перенапряжениями. При этих испытаниях на конденсатор обычно длительно воздействует напряжение промышленной частоты 1,1—1,2 $U_{ном}$ и через определенные промежутки времени (5—10 мин) подается повышенное напряжение промышленной частоты длительностью около 1 с. Число таких перенапряжений в процессе испытания составляет 1000. По окончании испытаний не должны наблюдаться изменения $\mathrm{tg}\,\delta$ изоляции и характеристик ЧР.

Надежность импульсных конденсаторов оценивается чаще всего ресурсными испытаниями требуемого числа конденсаторов в номинальном режиме или при напряженностях до 1,2 $E_{ном}$. Это объясняется тем, что импульсные конденсаторы имеют высокие рабочие напряженности, близкие к пробивным, что не позволяет испытывать конденсаторы в форсированном режиме. Кроме того, ограниченный ресурс (обычно 10^4 импульсов) не делает время испытаний очень большим. При испытаниях необходимо обращать внимание на параметры разрядного контура, которые должны обеспечивать требуемый декремент колебаний и амплитуду разрядного тока. Ускорение испытаний импульсных конденсаторов может быть осуществлено за счет увеличения частоты следования импульсов. Возникающее при этом некоторое повышение температуры диэлектрика практически не влияет на ресурс.

В результате ресурсных испытаний получается ряд стохастических значений ресурса или вариационный ряд, статистический анализ которого позволяет вскрыть закономерности изменения надежности. Его основной целью является отыскание уравнения регрессии или теоретического распределения, наилучшим образом описывающего данное эмпирическое. В математической статистике разработан ряд критериев согласия, позволяющих с определенной вероятностью утверждать, противоречит или не противоречит данное теоретическое распределение эмпирическому. По ним проверяется несколько теоретических распределений, и если ему не противоречат одновременно несколько из них, то выбирается простейшее. Одним из методов подбора теоретического распределения является метод вероятностных бумаг. По этому методу на вероятностных бумагах для различных распределений строится полученная эмпирическая функция, и там, где опытные точки ближе всего располагаются к прямой, это теоретическое распределение и будет наилучшим. Недостаток этого метода состоит в том, что «на глаз» не всегда отчетливо различимо, для какого распределения точки располагаются ближе к прямой. Он может быть устранен алгебраизацией его. Для этого уравнения теоретических распределений приводятся к линейному виду. Затем методом наименьших квадратов с использованием

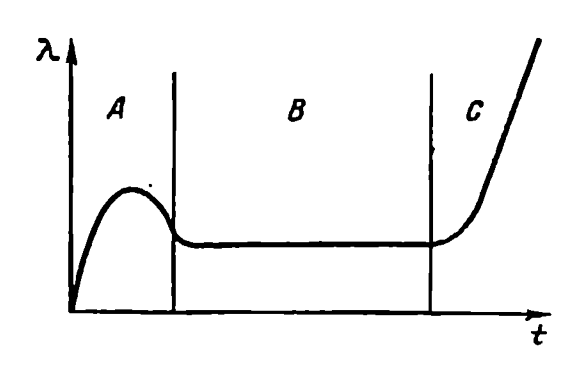


Рис. 10.16. Изменение интенсивности отказов при эксплуатации

вариационного ряда определяются параметры этих распределений, а затем суммы квадратов отклонений Δ^2 теоретической $F(N_i)$ от эмпирической $F_э(N_i)$ функции распределения для каждого распределения:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^{N} \left[F(N_i) - F_э(N_i)\right]^2, \qquad (10.54)$$

где N — число членов вариационного ряда.

Теоретическое распределение с наименьшим Δ^2 и будет наилучшим. Для конденсаторов для повышения коэффициента мощности в установках промышленной частоты и в импульсных конденсаторах распределение ресурса наилучшим образом описывается законом Вейбулла с параметрами, различными для разных типов конденсаторов:

$$F(\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau^\alpha) = 1 - \exp\left[-(\tau/\tau_0)^\alpha\right], \qquad (10.55)$$

где λ и α или τ_0 и α — параметры распределения.

Изменение интенсивности отказов во времени в процессе эксплуатации схематически можно представить в виде кривой (рис. 10.16). На ней отчетливо различаются три участка — A, B и C. Участок A соответствует началу эксплуатации, и интенсивности отказов в нем возрастают. Это есть период приработки, и отказы здесь обусловлены грубыми дефектами производства или материалов, которые не могли быть обнаружены при приемо-сдаточных испытаниях. Интенсивность отказов на участке B, соответствующем периоду нормальной эксплуатации, весьма слабо возрастает вследствие старения изоляции. На участке C интенсивность отказов снова резко возрастает вследствие появления износовых отказов из-за старения изоляции.

Глава одиннадцатая
ВЫБОР РАБОЧЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ

11.1. ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ РАБОЧУЮ НАПРЯЖЕННОСТЬ

Основной задачей, возникающей при проектировании конденсатора, является достижение максимального ресурса и надежности при минимальном расходе материалов. Ресурс и на-

дежность, как и расход материалов, зависят от напряжённости поля, которая является основным параметром, определяющим характеристики конденсатора. Для повышения ресурса и надежности напряженность должна снижаться, для снижения расхода материалов — повышаться, и при проектировании конденсаторов необходимо найти оптимальное соотношение между этими противоречивыми требованиями, для чего используются экономические факторы. Как показывают исследования и опыт эксплуатации, в конденсаторах для повышения коэффициента мощности в сетях промышленной частоты экономически оптимальной является напряженность поля в диэлектрике, которая при данной конструкции конденсатора, активных материалах и условиях эксплуатации обеспечивает ресурс в 20—30 лет для 90% продукции. Это требование распространяется обычно и на другие типы силовых конденсаторов. Конденсаторный диэлектрик является многокомпонентной системой с различными напряженностями поля в компонентах, которые однозначно выражаются через расчетную напряженность (2.2) и электрофизические параметры компонентов (см. § 3.1). Поэтому расчет конденсатора может производиться по расчетной напряженности, называемой рабочей, которая и нормируется. Выбор рабочей напряженности $E_р$ является одним из важнейших этапов расчета конденсатора.

Рабочая напряженность в диэлектрике силового конденсатора должна выбираться с учетом длительно воздействующего рабочего напряжения и кратковременных перенапряжений, воздействующих на конденсатор в процессе его эксплуатации. Выбор ее производится по следующим данным: на основании предшествующего опыта создания конденсаторов и опыта их эксплуатации; по допустимым характеристикам частичных разрядов; на основании тепловых расчетов, исходя из требования отсутствия перегревов сверх допустимых значений; на основании ускоренных испытаний. Рабочая напряженность должна выбираться такой, чтобы при перенапряжениях исключались как пробой диэлектрика, что определяется его кратковременной электрической прочностью, так и возникновение необратимых изменений в нем, что определяется характеристиками ЧР.

Наиболее слабым компонентом конденсаторного диэлектрика является пропитывающая жидкость. Ее свойства, определяющие интенсивность и другие характеристики ЧР, являются одним из основных факторов, ограничивающих напряженность поля в ней, а следовательно, и рабочую напряженность. Другим важным фактором, влияющим на выбор рабочей напряженности, является температура диэлектрика. Конденсатор имеет ограниченную теплоотводящую способность, и рабочая напряженность должна выбираться такой, чтобы при

длительном воздействии напряжения выделяемое в нем вследствие потерь тепло, пропорциональное квадрату напряженности, было полностью отведено и температура в диэлектрике не превышала допустимого для данных материалов значения. Какой из этих факторов будет превалировать — зависит от типа и назначения конденсатора и используемых материалов. Для бумажного диэлектрика, пропитанного полярными жидкостями, определяющим обычно является тепловой режим. Для бумажного диэлектрика, пропитанного нефтяным маслом, а также для бумажно-пленочного и пленочного диэлектриков определяющими являются процессы старения изоляции или характеристики ЧР.

Ограниченность теплоотвода конденсатора задает верхний предел $E_р$, при этом наибольшая допустимая для данного диэлектрика температура зависит от требуемого ресурса. Для пропитанных бумажного и бумажно-пленочного диэлектриков при экономически оптимальном ресурсе эта температура составляет 95° С, если это допускает пропитывающая жидкость; для пленочного она не должна превосходить 80° С. Для бумажного диэлектрика, пропитанного нефтяным маслом, она составляет 65—70° С. При проектировании конденсатора должен быть предусмотрен запас по термической устойчивости. Определенное из тепловых расчетов значение $E_р$ согласуется затем со значением, рассчитанным по допустимым характеристикам ЧР во всем температурном диапазоне работы конденсатора. Поэтому для данного диэлектрика должны быть известны зависимости напряженности возникновения ЧР от температуры и толщины диэлектрика. Характеристики начальных ЧР определяют рабочую напряженность, критических — уровни допустимых перенапряжений.

11.2. ВЫБОР РАБОЧЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Для бумажно-масляной изоляции допустимая рабочая напряженность определяется по допустимой мощности ЧР, при которой в течение заданного ресурса в диэлектрике исключено образование сосредоточенных газовых включений, возникающих при условии (9.24). Тогда для заданного ресурса τ из (10.33) можно найти допустимую мощность ЧР:

$$P_{чр.доп} \leqslant C_г V_ж / B\tau. \qquad (11.1)$$

Используя зависимость мощности ЧР от напряженности по (9.19), находим допустимую рабочую напряженность:

$$E_р = (C_0 V_ж / A_2 B\tau)^{1/a}. \qquad (11.2)$$

Расчеты показывают, что для конденсаторов с бумажно-масляным диэлектриком толщиной порядка 80 мкм при среднем ресурсе около 30 лет, при напряжении промышленной частоты допустимая напряженность равна 12—14 МВ/м. При изменении толщины диэлектрика допустимая рабочая напряженность изменяется приблизительно в соответствии с (9.33). Для изоляции из конденсаторной бумаги КОН-1 с толщиной листа 10—12 мкм допустимая рабочая напряженность

$$E_р = 3{,}3 d_с^{-0{,}58}, \qquad (11.3)$$

где $E_р$ — в МВ/м; $d_с$ — в мм.

Для изоляции, пропитанной газостойкими жидкими диэлектриками, в том числе хлордифенилами или их заменителями, допустимые рабочие напряженности могут определяться также допустимой мощностью ЧР. Используя (10.36), (10.37) и (9.19), имеем

$$E_р = (W_0/\tau A_2)^{1/n}, \qquad (11.4)$$

при этом, в связи со значительно большей стабильностью поведения этих жидких диэлектриков в электрическом поле рабочие напряженности могут быть существенно увеличены. Так, например, для бумажной изоляции, пропитанной трихлордифенилом,

$$E_р = 4{,}3 d_с^{-0{,}58}, \qquad (11.5)$$

где $d_с$ — в мм; $E_р$ — в МВ/м, что соответствует $E_р = 16 \div 20$ МВ/м для толщины изоляции секции 50—60 мкм.

Однако столь высокие рабочие напряженности могут привести к недопустимому нагреву конденсатора и выходу его из теплового равновесия. Поэтому применение указанных рабочих напряженностей возможно только одновременно с применением ряда мероприятий по снижению $\operatorname{tg}\delta$ изоляции от $(2-2{,}5)\cdot 10^{-3}$ до $(1{,}2-1{,}5)\cdot 10^{-3}$. Это достигается за счет применения малопотерьной конденсаторной бумаги пониженной плотности, оксидной бумаги, специальных стабилизирующих соединений, добавляемых в жидкие диэлектрики и уменьшающих возрастание $\operatorname{tg}\delta$ в процессе эксплуатации, и других мероприятий.

Применение неполярных синтетических пленок, имеющих более высокую электрическую прочность, позволяет уменьшить общую толщину диэлектрика $d_с$, вследствие чего напряженность возникновения ЧР возрастает примерно в $1/\sqrt{d_с}$ раз и значение $E_р$ может быть увеличено. При неполярной пленке с $\varepsilon_{rп} < \varepsilon_{rж}$ наибольшая напряженность будет в пленке (см. § 3.1). На рис. 11.1 показаны зависимости напряженностей в компонентах пропитанного бумажно-пленочного диэлектрика с неполярной

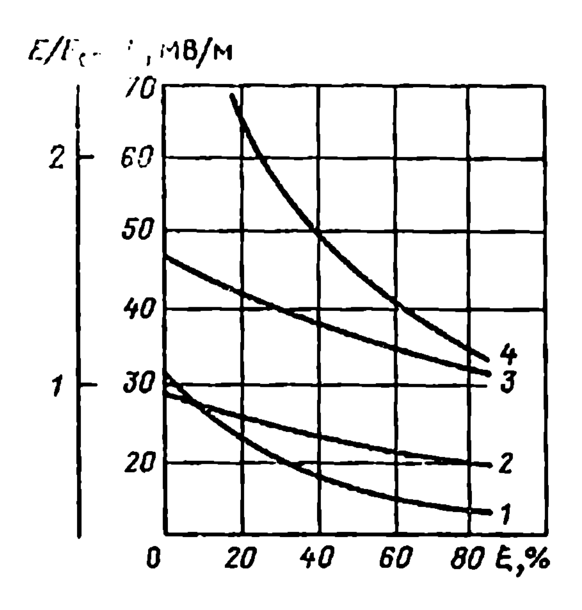


Рис. 11.1. Влияние содержания пленки $\zeta=1-\varkappa$ из полипропилена на напряженность электрического поля в компонентах:

1 — в трихлордифениле и пропитанной им бумаге; 2 — в пропитанной неполярной жидкостью бумаге; 3 — в неполярной жидкости и пропитанной ею пленке; 4 — в пропитанной трихлордифенилом пленке. Кривые получены при коэффициенте запрессовки $k=0{,}9$ и средней напряженности 30 МВ/м

пленкой от доли пленки в нем при пропитке неполярным жидким диэлектриком и трихлордифенилом. Из него видно, что при пропитке неполярным жидким диэлектриком напряженности поля в пленке $E_п$ и масле $E_ж$ примерно одинаковы и почти вдвое превышают напряженность поля $E_б$ в пропитанной бумаге. Пленка оказывается нагруженной значительно ниже, а жидкость — выше своих возможностей. При пропитке трихлордифенилом напряженности в нем и в пропитанной бумаге резко снижаются по сравнению с таковыми при пропитке маслом, а напряженность $E_п$ в наиболее устойчивом компоненте — пленке — увеличивается, что позволяет увеличить рабочую напряженность, не превышая допустимых значений $E_ж$ и $E_б$. Применение неполярных пленок приводит также к уменьшению $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика и создает возможность повышения $E_р$ с точки зрения допустимого перегрева. Допустимая рабочая напряженность в пропитанном бумажно-пленочном диэлектрике выбирается такой, при которой $E_б \leqslant E_{р.б}$ в пропитанной бумажной изоляции. Тогда из (3.1) средняя рабочая напряженность комбинированного диэлектрика

$$E_{р.комб}=E_{р.б}\left[\left(\varepsilon_{rп}+\zeta\left(\varepsilon_{rб}-\varepsilon_{rп}\right)\right]/\varepsilon_{rп}, \qquad (11.6)$$

где $\zeta=1-\varkappa$ — относительное содержание пленки в бумажно-пленочном комбинированном диэлектрике.

Удельная энергия конденсатора с комбинированным диэлектриком равна:

$$W_{уд.комб}=\varepsilon_0 E^2_{р.комб}/2=\varepsilon_{0б}E^2_{р.б}\left[\varepsilon_{rп}+\zeta\left(\varepsilon_{rб}-\right.\right.$$
$$\left.\left.-\varepsilon_{rп}\right)\right]/2\varepsilon_{rп}=W_{уд.б}\left[\varepsilon_{rп}+\zeta\left(\varepsilon_{rб}-\varepsilon_{rп}\right)\right]/\varepsilon_{rп}. \qquad (11.7)$$

Формулу (11.7) можно представить в виде

$$W_{уд.комб}/W_{уд.б}=\left[\varepsilon_{rп}+\zeta\left(\varepsilon_{rб}-\varepsilon_{rп}\right)\right]/\varepsilon_{rп}. \qquad (11.8)$$

С увеличением доли пленки ζ значение $W_{уд.комб}$ будет возрастать, и скорость роста будет тем больше, чем больше отношение $\varepsilon_{rб}/\varepsilon_{rп}$. Бумажно-пленочный диэлектрик обычно

имеет толщину $d_c = 30 \div 36$ мкм и состоит из двух листов пленки, между которыми находится один лист конденсаторной бумаги. Допустимые напряженности для такой системы при напряжении промышленной частоты могут быть приняты в бумаге, пропитанной газостойкой жидкостью, например фенилксилилэтаном, 20—28 МВ/м и в пленке до 50 МВ/м. Для конденсаторов с диэлектриком из полипропиленовой пленки при $d_c = 30 \div 36$ мкм E_p может достигать до 50 МВ/м, а для металлизированной полипропиленовой пленки с $d_c = 6 \div 8$ мкм $E_p = 60 \div 70$ МВ/м. Повышение E_p, а следовательно, и технико-экономических характеристик конденсатора связано с повышением однородности электрического поля в секции, одним из путей достижения которой является загибание краев одной фольговой обкладки и сдвиг их относительно краев другой — обычной обкладки, как это показано на рис. 12.5 [8.3]. В такой конструкции $E_p \approx 60$ МВ/м. Применение формованных конденсаторов с металлизированным диэлектриком (с опрессовкой эпоксидными компаундами) позволяет значительно повысить напряжение ЧР и допустимые рабочие напряженности (рис. 11.2) [9.15].

Выбранное значение E_p проверяется экспериментально на опытных образцах конденсаторов, при этом определяются также тепловые характеристики конденсаторов, в том числе и температура наиболее нагретой точки диэлектрика с помощью термопары, и проводятся испытания на ресурс в форсированном режиме. Следует иметь в виду, что повышение напряженности и температуры при таких испытаниях допустимо в ограниченных пределах, в которых не нарушается подобие процессов старения. Обычно при ресурсных испытаниях $E_и = (1{,}3 \div 1{,}8) E_p$.

В конденсаторах для электротермических установок E_p определяется практически только тепловым режимом. Эти конденсаторы изготавливаются на стандартные частоты 500, 1000, 2400, 4000 и 10 000 Гц и имеют одинаковую конструкцию с другими конденсаторами с водяным охлаждением. Теплоотвод у них практически совершенно не зависит от окружающих условий и определяется только температурой охлаждающей воды. Допустимая входная температура охлаждающей воды не должна превышать +30° С, и разность температур воды на входе и выходе составляет 5° С, что регулируется расходом воды. Так как количество тепла, отводимое конструкцией, не зависит от рабочей частоты конденсатора f и одинаково для всех частот, то потери мощности в нем не должны превышать некоторого значения, одинакового для всех частот. Это условие количественно можно выразить в виде

$$f E_p^2 \operatorname{tg} \delta = \text{const} = A. \quad (11.9)$$

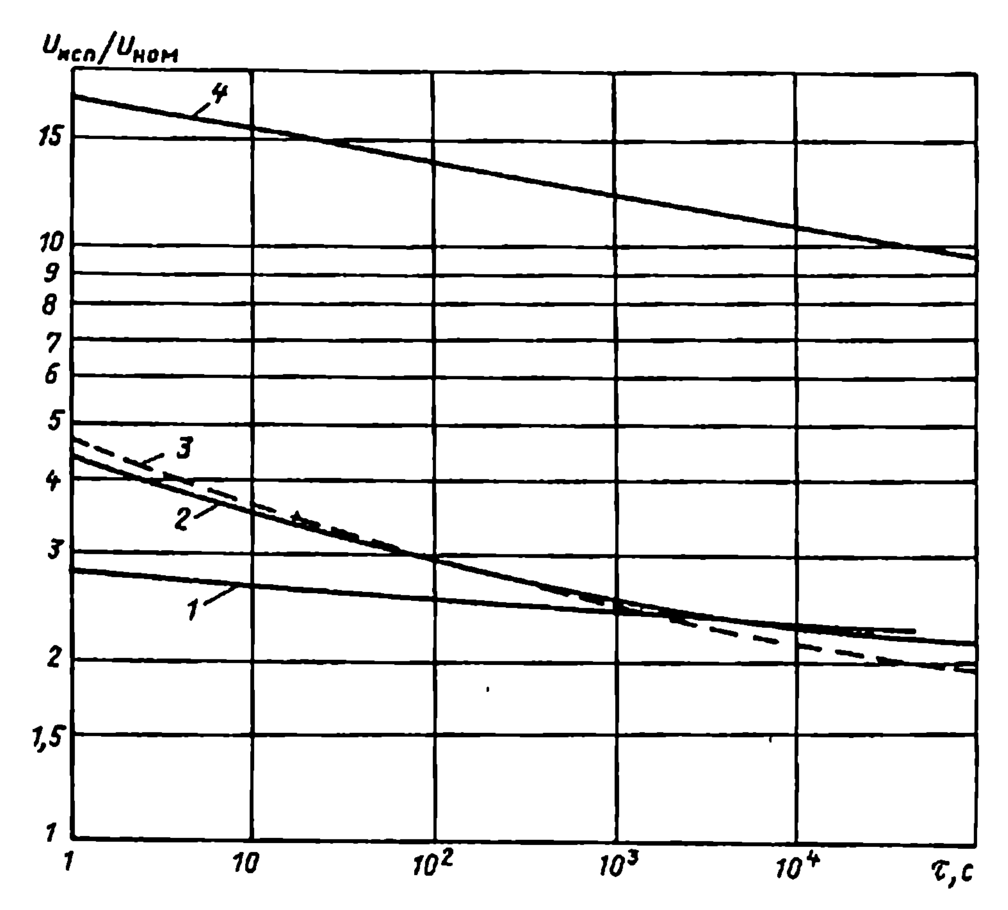


Рис. 11.2. Длительная электрическая прочность конденсаторов с металлизированным диэлектриком:

1 — металлизированная бумага, пропитка жидким диэлектриком; *2* — металлизированная пленка, пропитка жидким диэлектриком; *3* — металлизированная пленка с элегазовым заполнением; *4* — металлизированная пленка, формованный конденсатор

В конденсаторах повышенной частоты $\operatorname{tg}\delta$ может иметь значительную зависимость от частоты, что необходимо учитывать. Из (11.9) следует

$$E_р=\sqrt{A/f\operatorname{tg}\delta}. \qquad (11.10)$$

Определив из теплового расчета значение A для какого-либо конденсатора и пользуясь (11.10), можно рассчитать $E_р$ для конденсаторов с другими рабочими частотами. Затем расчет проверяется на опытных образцах (после чего вносятся окончательные коррективы).

Уровень технологии изготовления конденсатора — значения остаточного давления и температуры при термовакуумной обработке, чистота и общая культура технологического процесса — могут также оказывать заметное влияние на рабочую напряженность.

11.3. ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ РАБОЧИХ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ПО ДАННЫМ УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Значения $E_р$, выбранные на основании предшествующего опыта разработки и эксплуатации конденсаторов или рассчитанные по характеристикам ЧР, должны проверяться проведением ускоренных ресурсных испытаний. Они проводятся обычно на двух партиях разрабатываемых конденсаторов при двух различных значениях испытательных напряженностей $E_{и1}$ и $E_{и2}$, которые, как указывалось выше, должны находиться в пределах 1,3—1,8 $E_р$. По данным этих испытаний строятся функции распределения ресурса (рис. 11.3), обычно представляющие в вейбулловской системе координат прямые, по которым определяются значения ресурсов τ_1 и τ_2 для заданной вероятности p. Далее, полагая, что зависимость ресурса от напряженности описывается формулой (10.25), для заданной вероятности находят показатель степени:

$$a = \ln(\tau_2/\tau_1)/\ln(E_{и1}/E_{и2}). \qquad (11.11)$$

При дальнейших расчетах исходными являются заданные значения гамма-процентного ресурса τ_γ и надежности γ, %, где $\gamma/100 = 1-p$ и p — вероятность, принятая при определении ресурсов τ_1 и τ_2 по экспериментальным функциям распределения рис. 11.2. Предположив далее, что зависимость изменения ресурса от напряженности (10.25) сохраняет силу при изменении напряженности в диапазоне от $E_р$ до $E_и$, можно определить рабочую напряженность:

$$E_р = E_{и2}(\tau_2/\tau_\gamma)^{1/a}. \qquad (11.12)$$

Обычно такие расчеты проводятся, исходя из значений ресурса при $\gamma = 50\%$ ($p = 0{,}5$) и $\gamma = 90\%$ ($p = 0{,}1$). Иногда графики функций распределения имеют излом или разный угол наклона в вейбулловской системе координат. Это приводит к тому, что показатель степени в формуле (10.25) имеет разные значения для разных вероятностей p.

Для выбора рабочей напряженности может быть использовано также выражение (10.43), из которого следует

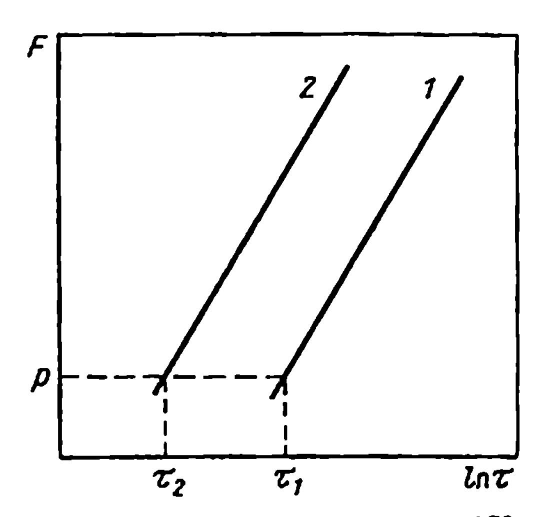


Рис. 11.3. К выбору рабочей напряженности по данным ускоренных испытаний: 1 — функция распределения ресурса при E_1; 2 — то же при $E_2 > E_1$ (используется вейбулловская система координат)

$$\tau_р = \tau_и \frac{\omega_и}{\omega_р} \left(\frac{E_и}{E_р}\right)^2 \exp\left[\alpha_ж(\Theta_и - \Theta_р) + \beta_ж(E_и - E_р)\right]. \quad (11.13)$$

На основании ускоренных испытаний образцов можно определить значения $\tau_и$ для принятых условий испытания $E_и$, $\omega_и$ и $\Theta_и$ и найти M по (10.44). На основании полученных значений $\tau_и$ для принятого $E_и$ значение $E_р$ может быть определено для заданных значений $\tau_р$, $\omega_р$ и $\Theta_р$ из (11.13), для чего необходимо знать коэффициенты $\alpha_ж$ и $\beta_ж$, определяющие зависимость проводимости от напряженности и температуры для данной жидкости и входящие в (11.13) Значение $E_р$ можно определить и из (10.45), если известны M, $\alpha_ж$, $\beta_ж$, Θ_0 и $F_{ж0}$.

11.4. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА РАБОЧИХ НАПРЯЖЕННОСТЕЙ ДЛЯ КОНДЕНСАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ ПРИ ПОСТОЯННОМ И ИМПУЛЬСНОМ НАПРЯЖЕНИЯХ

Выбор $E_р$ для конденсаторов, работающих при постоянном напряжении, производится с учетом электрохимического старения диэлектрика и старения под воздействием ЧР, а также воздействующих на него в процессе эксплуатации перенапряжений. При выборе $E_р$ должна учитываться также и длительность ожидаемой эксплуатации конденсатора под напряжением. Так, в конденсаторах для испытательных установок постоянного напряжения, работающих с большими перерывами, $E_р$ может быть увеличено по сравнению с конденсаторами, непрерывно находящимися под воздействием постоянного напряжения. В длительно работающих при постоянном напряжении конденсаторах $E_р = 35 \div 40$ МВ/м, а в конденсаторах, работающих в испытательных схемах, она может быть увеличена до 60-- 80 МВ/м. Если конденсатор работает при смешанном напряжении, содержащем переменную и постоянную составляющие, рабочие напряженности выбираются отдельно по постоянной и переменной составляющим, при этом рабочая напряженность по переменной составляющей должна быть снижена примерно на 20% по сравнению с напряженностью при чисто переменном напряжении, так как при наличии постоянной составляющей понижается напряженность возникновения начальных ЧР примерно на 15—20%.

Выбор $E_р$ для импульсных конденсаторов определяется кратковременной электрической прочностью и характеристиками ЧР. Поскольку импульсное напряжение воздействует на диэлектрик в течение очень малого промежутка времени, это позволяет существенно увеличить значение $E_р$ в них. Расчет

$E_р$ по формулам, аналогичным (11.2) или (11.4), при ограниченном ресурсе конденсатора (менее 10^4 импульсов) и малой частоте повторения — менее 10 импульсов/мин — приводит к значениям, лежащим между напряженностями возникновения начальных $E_м$ и критических $E_{кр}$ ЧР. Так, для конденсаторов с диэлекриком из бумаги КОН-2 толщиной 80 мкм, пропитанным касторовым маслом, может быть принята $E_р = 80 \div 100$ МВ/м. При значительном сокращении ресурса она может быть увеличена до 120 МВ/м.

За последние годы произошло существенное повышение рабочих напряженностей и соответственно удельной энергии импульсных конденсаторов, которое стало возможным за счет следующих мероприятий.

1. Применение конденсаторных диэлектрических материалов с повышенной электрической прочностью: конденсаторных бумаг с повышенной плотностью ($\gamma_б \geqslant 1{,}35$ т/м^3), пониженным количеством токопроводящих включений и слабых мест на единице площади; полимерных пленок с $E_{пр} = 600 \div 800$ МВ/м, с малым разбросом $E_{пр}$ (полиэтилентерефталат, полипропилен) и повышенной диэлектрической проницаемостью (поливинилиденфторид, $\varepsilon_{rп} = 12 \div 14$).

2. Применение пропитывающих жидкостей с повышенной стойкостью в электрическом поле (фенилксилилэтан) и повышенной прочностью газообразных продуктов, возникающих при разложении жидкости в электрическом поле (фторсодержащие жидкости).

3. Уменьшение толщины диэлектрика секции $d_с$ до 30 40 мкм, что возможно за счет уменьшения количества слабых мест на единице площади в конденсаторных бумагах и пленках. Уменьшение $d_с$ приводит к ослаблению краевого эффекта в соответствии с (2.34)—(2.36) и увеличению напряженности ЧР и допустимых напряженностей в соответствии с (9.33).

4. Переход от колебательного к апериодическому разряду конденсатора в рабочем режиме. При декременте колебаний колебательного разряда $\Delta = 1{,}4$ этот переход позволяет увеличить рабочую напряженность приблизительно в 1,5 раза при условии, что она не ограничивается кратковременной электрической прочностью.

5. Сокращение ресурса. При сокращении ресурса с 10^4 импульсов до 10^3 импульсов рабочая напряженность может быть увеличина в 1,2 раза.

6. Совершенствование технологии изготовления конденсатора: ужесточение методики отбраковки секций, улучшение термовакуумной обработки.

За счет этих мероприятий, например, для диэлектрика из бумаги ЭМКОН-3 с пониженной толщиной 40—50 мкм, пропитанного касторовым маслом или жидкими диэлектриками,

имеющими более высокую газостойкость; при ресурсе не менее 10^4 импульсов $E_р$ может быть увеличена до 160 МВ/м, а при ресурсе порядка 10^3 импульсов — до 200 МВ/м. Для бумажно-пленочного и пленочного диэлектриков, в которых напряженность поля в прослойке жидкости ниже, принимаются более высокие значения $E_р$ и в отдельных конструкциях с ограниченным ресурсом могут составлять до 230 МВ/м. При большой частоте следования импульсов (более 10 импульсов/мин) $E_р$ может определяться также тепловым режимом работы конденсатора. Расчет допустимых значений или перепада температур практически не отличается от аналогичного расчета конденсаторов промышленной частоты.

Глава двенадцатая

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

12.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

При расчете конденсатора задаются ряд исходных параметров и технические требования, которым он должен удовлетворять. Для конденсаторов, работающих при синусоидальном переменном напряжении, задаются номинальное напряжение $U_{ном}$, номинальная частота $f_{ном}$, номинальная емкость $C_{ном}$, а также перегрузки и перенапряжения, которые они должны выдерживать. Вместо емкости может быть задана номинальная реактивная мощность $Q_{ном}$. Если напряжение несинусоидально, то задаются его гармонический состав и форма кривой. При пульсирующем напряжении (конденсаторы для линий электропередачи постоянного тока, фильтровые и др.) задаются постоянная составляющая, гармонический состав и форма кривой переменной составляющей. При расчете импульсных конденсаторов задаются амплитуда импульса, их форма и частота следования. Дополнительно могут быть заданы собственная индуктивность, амплитуда напряжения противоположной полярности (реверс) при колебательном разряде и др. При расчете конденсаторов любого типа должен быть задан его ресурс, обычно выражаемый в годах. Для импульсных конденсаторов он может быть задан числом импульсов. Задаются также форма, значение и время приложения испытательного напряжения. Должны быть заданы также и условия работы конденсатора: условия охлаждения — диапазон

изменения окружающей температуры; интенсивность солнечной радиации; входная температура охлаждающей воды для электротермических конденсаторов и др.; режим работы — длительный, повторно-кратковременный и т. д.; величина, форма и частота следования перенапряжения; допустимые отклонения емкости, номинальной мощности или запасаемой энергии от номинального значения.

В основе проектирования силовых конденсаторов лежит общий принцип, состоящий в том, что для заданных условий и режима работы конденсатор должен иметь максимальные ресурс и надежность при минимальных объеме, массе и стоимости, т. е. при оптимальных удельных характеристиках. Из него вытекают другие требования. В отдельных случаях, при работе конденсатора в специальных условиях, могут преобладать специальные требования, как, например, требование повышенной надежности, которые будут определяющими при расчете. Центральное место в процессе проектирования конденсатора занимает вопрос о выборе рабочей напряженности $E_р$ (см. гл. 11). После выбора $E_р$ производится собственно расчет конденсатора: определяются параметры секции — толщина диэлектрика $d_с$, размер закраины, число витков и ее емкость; определяется необходимое число последовательно соединенных групп и число параллельно включенных секций в группе; производится расчет изоляции пакета от корпуса при металлических корпусах: определяются размеры пакета и корпуса и выбираются проходные изоляторы. По окончании электрического расчета конденсатора производится его тепловой расчет. Расчет параметров цилиндрических секций на основе диэлектрической системы с мягкой обкладкой производится точно так же, как и плоскопрессованных, но коэффициент запрессовки принимается равным единице.

12.2. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА УДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Удельные характеристики конденсатора зависят как от электрофизических свойств образующих диэлектрик материалов и рабочей напряженности поля, так и конструктивных факторов — коэффициента запрессовки, толщины диэлектрика и т. д. Активный объем спирально намотанной плоскопрессованной секции

$$V_{с.а}=S_{п}(d+d_{ф})=V_{с.а.д}(1+k/\xi), \qquad (12.1)$$

где $S_а$ — активная площадь обкладок; $V_{с.а.д}$ — объем активного диэлектрика секции; $d=d_с/k$; $\xi=d_с/d_ф$ и после замены $S_а=C_с d/\varepsilon_0\varepsilon_r$ и $d_с=U_с/E_р$ и преобразований

$$V_{с.а}=C_с U^2(1+k/\xi)/\varepsilon_0\varepsilon_r k^2 E_р^2. \qquad (12.2)$$

Поделив реактивную мощность секции $Q_с=2\pi f C_с U_с^2$ на $V_{с.а}$ с заменой ε_r по (8.7а), получим

$$Q'_{уд.с.а}=(Q_с/V_{с.а})=2\pi f k^2\varepsilon_0\varepsilon_{rк}E_р^2\beta/(1+k/\xi)\times$$
$$\times\varkappa\left[1-\frac{k\gamma}{\gamma_к}(1-\beta)\right]+(1-\varkappa)\left[1-kk_d\left(1-\frac{\varepsilon_{rк}}{\varepsilon'_{rп}}\beta\right)\right]. \qquad (12.3)$$

Зависимость (12.3) не имеет экстремума ни по одному конструктивному параметру (ξ, $\varkappa$). При $n_с$ секциях в конденсаторе его активный объем

$$V_а=n_с V_{с.а}=n_с V_{с.а.д}(1+k/\xi). \qquad (12.4)$$

Полный объем конденсатора кроме активного содержит объемы закраин $V_з$, изоляции пакета от корпуса $V_и$, зависящего от номинального напряжения конденсатора, металла корпуса $V_м$, и некоторый дополнительный объем для монтажа $V_{доп}$:

$$V=V_а+V_з+V_и+V_м+V_{доп}. \qquad (12.5)$$

Коэффициент использования объема

$$k_v=(V_а/V)=V_а/(V_а+V_з+V_и+V_м+V_{доп})=$$
$$=1/[1+(2l_з/b_а)+k_и(d_и)+k_м+k_{доп}], \qquad (12.6)$$

где

$$k_и(d_и)=V_и/V_а;\quad k_м=V_м/V_а;\quad k_{доп}=V_{доп}/V_а.$$

Заменяя $V_а=k_v V$, получаем

$$V=n_с V_{с.а.д}(1+k/\xi)/k_v. \qquad (12.7)$$

Реактивная мощность конденсатора $Q_к=n_с Q_с$, и его удельная характеристика

$$Q_{уд}=\frac{Q_к}{V}=\frac{n_с Q_с k_v}{n_с V_{с.а.д}(1+k/\xi)}=Q_{уд.с.а.д}\frac{k_v}{(1+k/\xi)}, \qquad (12.8)$$

где $Q_{уд.с.а.д}=Q_с/V_{с.а.д}$ — удельная характеристика секции по активному объему диэлектрика.

Подставляя значение k_v из (12.6) в (12.8), получаем

$$Q_{уд}=Q_{уд.с.а.д}\Big/\left(1+\frac{k}{\xi}\right)\left[1+\frac{2l_з}{b_а}+k_и(d_и)+k_м+k_{доп}\right]. \qquad (12.9)$$

Преобразуя (12.8) с использованием (12.6), получаем

$$V=\frac{C_к U_{ном}^2}{\varepsilon_0\varepsilon E_р^2}\left(1+\frac{k}{\xi}\right)\left[1+\frac{2l_з}{b_а}+k_и(d_и)+k_м+k_{доп}\right]. \qquad (12.10)$$

Из (12.10) следует, что объем диэлектрика в конденсаторе обратно пропорционален квадрату рабочей напряженности. Чем выше $E_р$, тем меньше расход материалов и тем экономичнее конденсатор. Но увеличение $E_р$ снижает ресурс и надежность конденсатора, и при проектировании его нужно найти оптимальное значение. Зная объем конденсатора, можно ориентировочно найти размеры его корпуса и ширину диэлектрика. Об оптимальном соотношении размеров корпуса при их выборе см. в гл. 14, § 14.7. Затем они уточняются в процессе конструкторского расчета.

12.3. НОМИНАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ

Условия эксплуатации конденсаторов и конденсаторных батарей, а также условия и режимы их испытаний при выпуске изготовителем регламентируются рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК), которые должны учитываться при разработке национальных нормативно-технических документов. В рекомендациях МЭК рассматриваются окружающие температурные условия, испытательные напряжения, перегрузки и т. д.

Вопросы регламентации конденсаторов для повышения коэффициента мощности рассматриваются в публикации 70 МЭК, в соответствии с которой разработан ГОСТ 1282-88 [17.1]. По температуре окружающей среды конденсаторы разбиваются по категориям, каждая из которых характеризуется двумя значениями температуры: минимальным, при котором допускается включение конденсатора под напряжение, и максимальным, при котором он может работать. По ГОСТ 1282-88 минимальные значения температур составляют −60, −40 и −25° С, максимальные +40, +45, +50 и +55° С. Значения рабочей температуры окружающего воздуха, °С, не должны превышать указанных ниже.

Вид климатического исполнения	Верхнее значение	Средняя за 24 ч	Средняя за год
У3, ХЛ1	40	30	20
У3	45	35	25
У3, Т2, Т3	50	40	30
У1, У3, Т2, Т3	55	45	35

Под температурой окружающей среды для одиночного конденсатора понимается температура, измеренная на расстоянии 30 см от его корпуса на 2/3 его высоты, считая от основания. За температуру охлаждающего воздуха конденсаторной батареи принимается температура, измеренная в ее самой горячей точке. Нормальными температурными категориями являются

категории с границами −60/+40, −40/+40 и −25/+40° С. Конденсаторы могут работать при температуре ниже минимальной при условии, что включение их под напряжение будет производиться при температуре не ниже минимальной, соответствующей их категории. Конденсаторы должны допускать длительную работу при повышении действующего значения напряжения до 1,1 номинального при действующем значении тока до 1,3 тока при номинальных напряжении и частоте. Увеличение тока может происходить как за счет повышения напряжения, так и за счет высших гармонических или за счет того и другого независимо от гармонического состава тока.

Номинальные условия эксплуатации и требования к испытаниям электротермических конденсаторов на частоты 40—24 000 Гц устанавливаются публикацией 110 МЭК, в соответствии с которой разработан ГОСТ 18689-81 [17.3], относящийся как к конденсаторам с принудительным воздушным или водяным охлаждением, так и с естественным воздушным. Они также разбиваются по температурным категориям. Нижние пределы категории выбираются из ряда 40, 25, −10 и 0° С, верхние должны соответствовать приведенным данным.

Вид охлаждения	Максимальная температура охлаждающего воздуха, °С
Естественное воздушное	40, 45
Принудительное воздушное:	
на входе	35, 40
на выходе	40, 45
Водяное	50

Для конденсаторов с водяным охлаждением температура охлаждающей воды на входе составляет 30 или 40° С и на выходе соответственно 35 или 45° С.

Для конденсаторов связи, отбора мощности, делителей напряжения, измерительных номинальные условия эксплуатации регламентируются публикацией 358 МЭК, в соответствии с которой разработан ГОСТ 15581-80 [17.2]. Нижние пределы температур для этих конденсаторов должны выбираться из ряда −50, −40, −25, +15, +25° С, а верхние—из ряда +40, +45, +50, +55° С. Средние значения верхних граничных температур за 24 ч и за год не должны превосходить соответственно +30, +35, +40, +45° С и +20, +25, +30 и +35° С. Согласно публикации 358 МЭК возможна любая комбинация верхнего и нижнего пределов температур. По ГОСТ 15581-80 для внутренних поставок номинальные значения климатических факторов должны соответствовать ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70. Поскольку эти конденсаторы подключаются непосредственно к линиям передач или оборудованию, связанному с ними, электрические режимы работы их определя-

ются режимом работы линии или оборудования. В общем случае номинальные климатические факторы и номинальные режимы работы, а также режимы испытаний задаются в техническом задании на разработку конденсатора. Там же указываются и возможные отклонения от них.

12.4. РАСЧЕТ ЕМКОСТИ СЕКЦИИ И ПАКЕТА

После выбора рабочей напряженности согласно данным гл. 11 находится напряжение на секции:

$$U_с = E_р d_с. \tag{12.11}$$

Для бумажного диэлектрика на переменном (50 Гц) напряжении $U_с = 1$ кВ. Это обусловлено тем, что такое напряжение позволяет для большинства типов конденсаторов использовать близкую к оптимальной (соответствующей максимуму электрической прочности, см. § 5.2) толщину диэлектрика. При $U_с > 1$ кВ значения $d_с$ превосходят оптимальную, что не только снижает $E_{пр}$, но и ухудшает характеристики ЧР. Для бумажно-пленочного и пленочного диэлектриков, рабочие напряженности в которых больше, чем в бумажном, возможно $U_с > 1$ кВ. В импульсных конденсаторах $U_с$ может достигать 10 кВ. В зависимости от типа и назначения конденсатора секции в нем могут соединяться параллельно, последовательно или смешанно, что определяется $U_с$. При $U_с = U_{ном}$ секции соединяются параллельно, при $U_с < U_{ном}$ необходимо их последовательное или смешанное соединение. Зная $U_с$, можно найти m — число последовательно соединенных групп:

$$m = U_{ном}/U_с. \tag{12.12}$$

Затем производится расчет емкости секции $C_с$, которая для спирально намотанной плоскопрессованной секции равна удвоенному значению емкости такой секции, развернутой в плоскую ленту:

$$C_с = 2\varepsilon_0 \varepsilon_r S_а / d_с, \tag{12.13}$$

где ε_r рассчитывается по формулам гл. 8; $S_а = b_ф l_ф$ — площадь активной части, м^2; $l_ф$ — длина фольги, м, определяемая по формуле

$$l_ф = \pi w D_{ср}; \tag{12.14}$$

здесь $D_{ср}$ — средний диаметр спирально намотанной секции, м; w — число витков.

Подставляя в (12.13) значения $S_а$ и $l_ф$, получаем

$$C_с = 2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r w b_ф D_{ср} / d_с. \tag{12.15}$$

Средний диаметр секции связан с параметрами секции и диаметром намоточной оправки $D_н$ соотношением

$$D_{ср}=D_н+2w(d_б+d_ф). \qquad (12.16)$$

После подстановки (12.16) в (12.15) будем иметь

$$C_с=\frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r b_а w}{d_с}\left[D_н+2w(d_б+d_ф)\right]. \qquad (12.17)$$

Полученная формула связывает конструктивные параметры секции с ее емкостью и может быть использована для расчета одного из них при известных других. Она применима для расчета секции с бумажным, бумажно-пленочным или пленочным диэлектриком.

По емкости секции и номинальной емкости $C_{ном}$ конденсатора находится число секций в пакете. При параллельном соединении $n_с$ одинаковых секций общая емкость C пакета равна $C=n_сC_с$, а при последовательном $C=C_с/n_с$. При смешанном соединении, когда пакет составляется из m последовательных групп с $n_с$ параллельно соединенными секциями в каждой группе (общее число секций в пакете $mn_с$), емкость пакета

$$C=n_сC_с/m. \qquad (12.18)$$

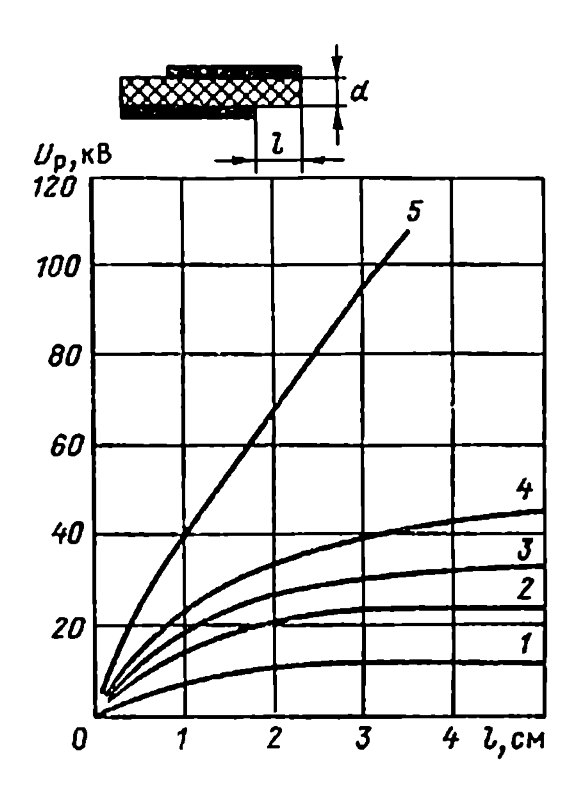
Обычно расчет производится для нескольких значений $C_с$, и выбирается оптимальный вариант. При параллельном соединении пакетов емкость конденсатора равна суммарной емкости пакетов.

12.5. РАСЧЕТ ШИРИНЫ ЗАКРАИНЫ

Пробой конденсатора при перенапряжениях может произойти не только сквозь толщу активного диэлектрика, но также и вследствие перекрытия по закраине, отделяющей обкладки друг от друга. Путь перекрытия по закраине для секций со скрытой фольгой состоит из удвоенных значений ширины закраины $l_з$ и толщины диэлектрика между ними $d_с$. Поскольку $d_с \ll l_з$, значением $d_с$ можно пренебречь, и расчетный путь перекрытия равен $2l_з$. Для секции с выступающей фольгой расчетный путь перекрытия при этом допущении равен $l_з$. Для расчета $l_з$ необходимо знать зависимость напряжения перекрытия $U_р$ $(l_з)$. Теоретическое рассмотрение вопроса приводит к сложным и мало удобным для практического применения соотношениям. Более удобной является эмпирическая зависимость

$$U_р=Al_з^{0,5}, \qquad (12.19)$$

Рис. 12.1. Разрядное напряжение $U_р$ (амплитуда) вдоль закраины при переменном (1—4) и постоянном (5) напряжении.
1 — 8 × 12; 2 — 5 × 50; 3 — 10 × 50; 4 — 9 × 120 мкм



где A — постоянная, зависящая от толщины диэлектрика и формы приложенного напряжения, определяемая экспериментально; $l_з$ — в см; $U_р$ — в кВ.

Для $d_c = 0,1$ мм и синусоидального напряжения

$$U_р = 8 l_з^{0,5}. \qquad (12.20)$$

Для постоянного напряжения разрядные напряжения значительно больше и весьма слабо зависят от толщины диэлектрика (рис. 12.1).

Напряжение перекрытия должно быть больше наибольшего напряжения на секции, которое обычно не превосходит испытательное $U_{исп}$. Выбрав $U_р = k_з U_{исп}$, где $k_з > 1$ — коэффициент запаса, которым следует задаться, использовав формулу (12.19); можно рассчитать величину $l_з$. Для секции со скрытой фольгой

$$l_з = (k_з U_{исп} / A)^2 / 2, \qquad (12.21)$$

и для секции с выступающей фольгой

$$l_в = (k_з U_{исп} / A)^2. \qquad (12.22)$$

К полученным из расчета значениям $l_з$ добавляется 1,5—2,5 мм на неточность (разброс) при намотке, а также на допуск по ширине фольги и бумаги. Номинальное значение $l_з$ должно быть не менее 5—7 мм.

12.6. РАСЧЕТ ИЗОЛЯЦИИ ПАКЕТА ОТ КОРПУСА

В силовых конденсаторах в качестве изоляции пакета от корпуса используются кабельная бумага или электрокартон. Толщина изоляции определяется требованиями к уровню электрической прочности и зависит от номинального напряжения конденсатора. Ниже приведены номинальные напряжения конденсаторов для повышения коэффициента мощности в сетях с частотой тока 50 Гц и соответствующие им значения испытательных напряжений.

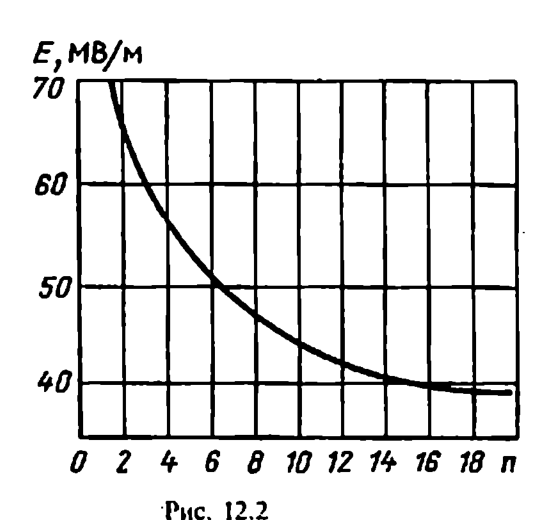


Рис. 12.2

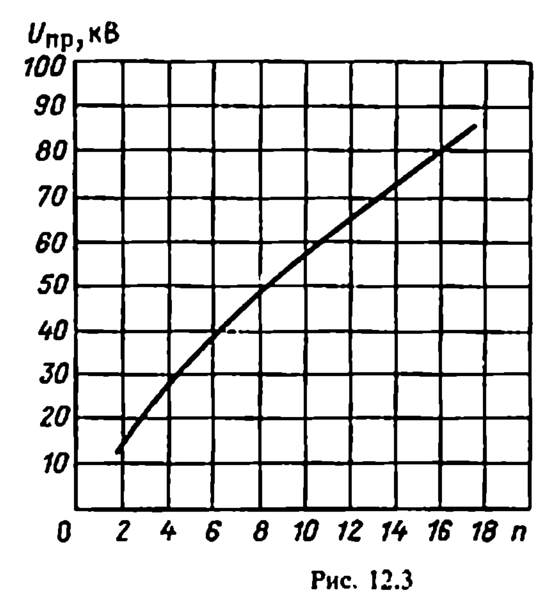


Рис. 12.3

E, МВ/м
70
60
50
40
30
20
0 0,5 1 1,5 2 2,5
d, мм

Рис. 12.2. Зависимость электрической прочности (при частоте 50 Гц) пропитанной трихлордифенилом кабельной бумаги КВ-120 от числа листов

Рис. 12.3. Зависимость пробивного напряжения (при частоте 50 Гц) пропитанной трихлордифенилом кабельной бумаги КВ-120 от числа листов

←

Рис. 12.4. Зависимость электрической прочности пропитанного трихлордифенилом электрокартона от его толщины

Номинальное напряжение, В	Испытательное напряжение 50 Гц, В	Максимальное значение полного грозового импульса, кВ	Рекомендуемое число листов кабельной бумаги марки КВ-120
230, 380, 500	3000	15	3
660, 1050	6000	25	5
3150	16 000	45	9
6300	22 000	60	11
10 500	28 000	75	15

Толщина изоляции, мм,

$$\Delta_{и}=(k_{и}U_{исп}/E_{пр})+\Delta_0, \tag{12.23}$$

в которой $2\leqslant k_{и}\leqslant 3$ — коэффициент запаса, учитывающий разброс пробивной напряженности; $U_{исп}$ — испытательное напряжение или из представленных выше, или задаваемое техническими условиями; $E_{пр}$ — электрическая прочность на частоте 50 Гц материала, используемого в качестве изоляции; для пропитанной кабельной бумаги ее зависимость от толщины приведена на рис. 12.2; Δ_0 — дополнительная толщина изоляции, составляющая для листового материала 1—2 листа. Практически при конструкторских расчетах изоляции из кабельной бумаги

удобнее пользоваться зависимостью пробивного напряжения от числа листов, приведенной на рис. 12.3. По этой кривой вначале находится толщина, соответствующая пробою при данном испытательном напряжении. Полученное значение толщины увеличивается в 2—3 раза, и к нему прибавляются 1—2 листа для механической защиты изоляции при сборке конденсаторов. Данные для пропитанного трихлордифенилом электрокартона приведены на рис. 12.4.

12.7. РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРОВ С ПЛЕНОЧНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

При набухании пленочного диэлектрика изменяются не только параметры пленки (см. § 5.7), но также расстояния между слоями набухшей пленки и пленкой и обкладками, определяемые коэффициентом запрессовки k. Определяющим значение k при расчете пленочного диэлектрика является требование, чтобы после набухания пленки и увеличения ее толщины как от собственно набухания, так и теплового расширения в секции не только не возникало распирающего ее давления на соседние слои, но между слоями набухшей пленки и пленкой и обкладками находился слой свободной жидкости, т. е.

$$k = nd/(nd + d_ж), \qquad (12.24)$$

где n — число слоев пленки; d — толщина одного слоя; $d_ж$ — суммарная толщина свободной пропитывающей жидкости.

Формуле (12.24) может быть придана более удобная для практических расчетов форма

$$k = nd/[nd + (n+1)d_п], \qquad (12.25а)$$

где $d_п$ — толщина одной воздушной прослойки, общее число которых равно $n+1$. Поделив числитель и знаменатель на nd, получим

$$k = 1\bigg/\left(1 + \frac{n+1}{n}\frac{d_в}{d}\right). \qquad (12.25б)$$

Значение $d_в$ определяется экспериментально с учетом увеличения толщины пленки от набухания, теплового расширения и предельного плюсового допуска на ее толщину. При пропитке фенилксилилэтаном можно принять $d_п \approx 2$ мкм. Если в диэлектрике используются пленки разной толщины, то в (12.25б) вместо nd подставляется сумма толщин.

Емкость секции как в непропитанном, так и в пропитанном состоянии составляется из двух частичных емкостей, соединенных последовательно: в непропитанном состоянии — емкости,

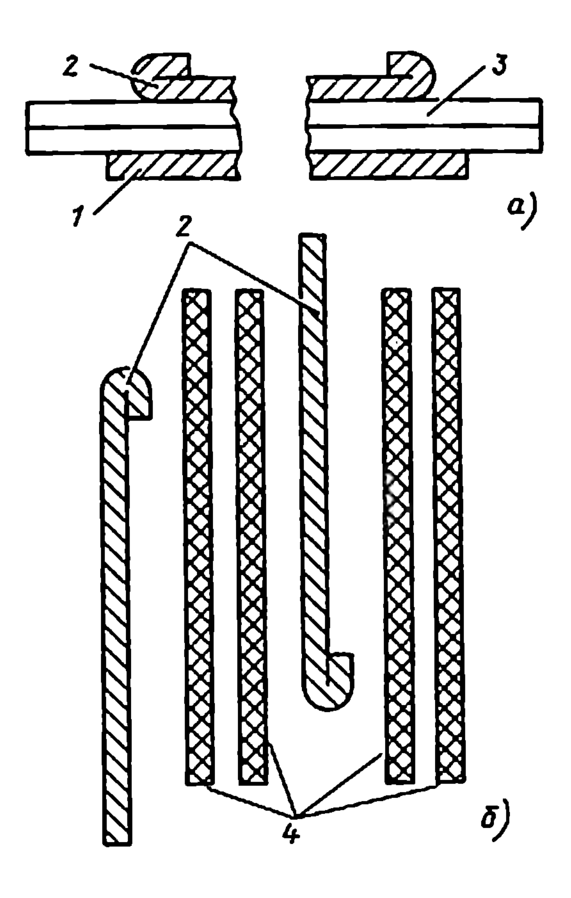


Рис. 12.5. Конструкции с загибанием краев одной обкладки (*а*) и противоположных краев каждой из обкладок (*б*):

1 — обычная обкладка; *2* — обкладка с загнутыми краями; *3* — шероховатая пленка; *4* — диэлектрик

образуемой ненабухшей пленкой толщиной nd с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_{rп}$, и емкости, образуемой воздушными прослойками суммарной толщиной $nd(1-k)/k$; в пропитанном состоянии — емкости, образуемой набухшей пленкой толщиной $k_d nd$ с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon'_{rп}$, рассчитываемой по (5.27), и емкости, образуемой прослойками свободной пропитывающей жидкости суммарной толщиной $d_ж = (nd/k) - k_d nd = nd(1-kk_d)/k$. Выражая эквивалентную емкость пропитанной секции

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S/(nd/k),$$

где ε_r — эквивалентная диэлектрическая проницаемость, через частичные емкости соответственно

$$C_п = \varepsilon_0 \varepsilon'_{rп} S/k_d nd; \quad C_ж = \varepsilon_0 \varepsilon_{rж} kS/(1-kk_d)nd$$

после подстановок и преобразований получаем

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'_{rп}\varepsilon_{rж}}{(1-kk_d)\varepsilon'_{rп} + kk_d\varepsilon_{rж}}. \tag{12.26}$$

Максимальное значение ε_r будет при $1-kk_d=0$ или $k=1/k_d$. При малой толщине пленочного диэлектрика напряженность возникновения ЧР в нем будет высокой, и она дополнительно может быть увеличена загибанием краев одной или обоих обкладок (рис. 12.5) [8.3]. Рабочие напряженности при этом могут достигать 50 МВ/м и более. В остальном расчет не отличается от приведенного выше. Для наиболее полного использования преимуществ пленочного диэлектрика и сокращения длительности технологического цикла из конструкции конденсатора должны быть полностью удалены и заменены синтетическими все материалы на основе целлюлозы.

12.8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ СЕКЦИЙ В КОНДЕНСАТОРЕ

В пакетах ряда конденсаторов (для делителей напряжения, импульсных) последовательно соединяется большое число секций, которое в конденсаторах связи и для делителей напряжения может достигать 100 и более. В них возникает значительная неравномерность распределения напряжения по такой цепочке. Значительная неравномерность распределения напряжения наблюдается и в некоторых типах импульсных конденсаторов, где как в зарядном, так и в разрядном режимах появляется значительная постоянная составляющая напряжения, и при распределении напряжения по секциям играют роль не только емкости, но и сопротивления изоляции (утечки) элементов конденсатора. То же имеет место и для конденсаторов, работающих при постоянном и смешанном напряжении.

Эквивалентная схема конденсатора с последовательно соединенными секциями представлена на рис. 12.6. В этой схеме C_i — емкость секции; R_i — сопротивление изоляции (утечка) секции; C_{1i} и R_{1i} — соответственно емкость и сопротивление изоляции секций относительно нижнего вывода конденсатора B_1; C_{2i} и R_{2i} — соответственно емкости и утечки секций относительно верхнего вывода B_2; n — общее число последовательно соединенных секций; i — номер секции, отсчитываемый от вывода B_2. В большинстве случаев можно принять равенство между собой емкостей $C_i = C_c$ и сопротивлений изоляции (утечек) $R_i = R_c$ секций, а также емкостей и утечек $C_{1i} = C_{01}$ и $R_{1i} = R_{01}$ на вывод B_1 и емкостей и утечек $C_{2i} = C_{02}$ и $R_{2i} = R_{02}$ на вывод B_2. При приложении к конденсатору переменного напряжения U распределение его по секциям будет определяться емкостями C_c, C_{01} и C_{02}. Наличие емкостей C_{01} приводит

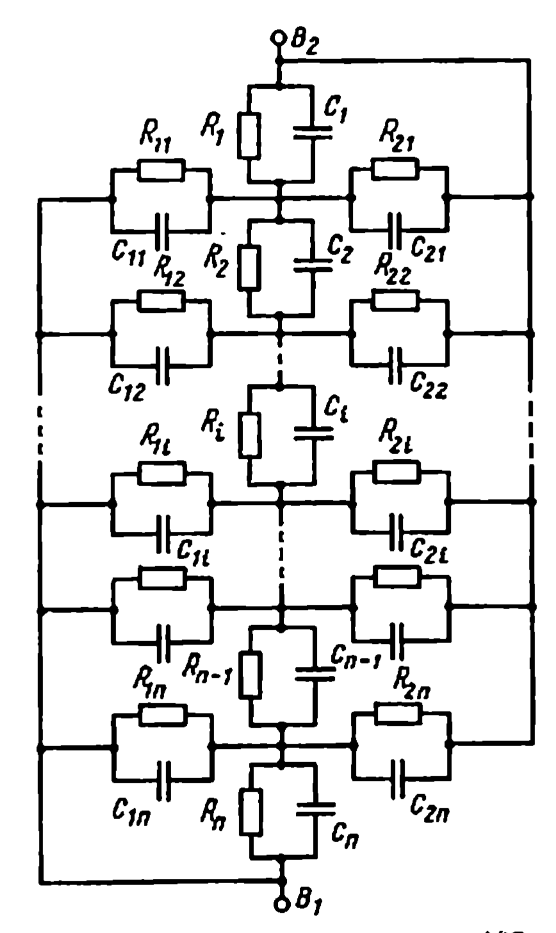


Рис. 12.6. Эквивалентная схема конденсатора с последовательно соединенными секциями

к увеличению напряжения на секциях, ближайших к выводу B_2, за счет увеличения протекающего по ним тока, а емкостей C_{02} — к увеличению напряжения на секциях, ближайших к выводу B_1. Распределение напряжения по секциям относительно вывода B_1 описывается выражением

$$U_i = U \frac{C_{01}}{C_{01}+C_{02}} \left[\frac{\operatorname{sh} m(n-i)}{\operatorname{sh} mn} - \frac{C_{02}}{C_{01}} \frac{\operatorname{sh} mi}{\operatorname{sh} mn} + \frac{C_{02}}{C_{01}} \right], \qquad (12.27)$$

в котором $m = \sqrt{(C_{01}+C_{02})/C_c}$.

При воздействии на конденсатор постоянного напряжения

$$U_i = U \frac{R_{02}}{R_{01}+R_{02}} \left[\frac{\operatorname{sh} m(n-i)}{\operatorname{sh} mn} - \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{\operatorname{sh} mi}{\operatorname{sh} mn} + \frac{R_{01}}{R_{02}} \right], \qquad (12.28)$$

в котором $m = \sqrt{R_c(R_{01}+R_{02})/(R_{01}R_{02})}$.

Напряжение, приходящееся на одну секцию при переменном напряжении, изменяется в зависимости от номера секции следующим образом:

$$\Delta U_i = U_{i-1} - U_i = U \frac{C_{01}}{C_{01}+C_{02}} \left[\frac{\operatorname{sh} m(n-i+1) - \operatorname{sh} m(n-i)}{\operatorname{sh} mn} - \right.$$

$$\left. - \frac{C_{02}}{C_{01}} \frac{\operatorname{sh} m(i-1) - \operatorname{sh} mi}{\operatorname{sh} mn} \right] \approx U \frac{mC_{01}}{C_{01}+C_{02}} \left[\frac{\operatorname{ch} m(n-i)}{\operatorname{sh} mn} + \frac{C_{02}}{C_{01}} \frac{\operatorname{ch} mi}{\operatorname{sh} mn} \right]. \qquad (12.29)$$

Как следует из (12.29), наибольшие напряжения возникают на секциях, ближайших к B_1 и B_2. Если $R_{01} \ll R_{02}$, то наибольшее напряжение будет на секции, ближайшей к выводу B_2, а при $C_{02} \gg C_{01}$ — ближайшей к B_1. Если вывод B_1 соединен с землей, то обычно емкость секции на землю значительно превосходит емкость секции на высоковольтный вывод ($C_{01} \gg C_{02}$) и наибольшее напряжение возникает на секции, ближайшей к выводу B_2.

При постоянном напряжении (или при наличии постоянной составляющей напряжения) U напряжение, приходящееся на секцию,

$$\Delta U_i = U_{i-1} - U_i = U \frac{R_{02}}{R_{01}+R_{02}} \left[\frac{\operatorname{sh} m(n-i+1) - \operatorname{sh} m(n-i)}{\operatorname{sh} mn} - \right.$$

$$\left. - \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{\operatorname{sh} m(i-1) - \operatorname{sh} mi}{\operatorname{sh} mn} \right] \approx U \frac{mR_{02}}{R_{01}+R_{02}} \left[\frac{\operatorname{ch} m(n-i)}{\operatorname{sh} mn} + \frac{R_{01}}{R_{02}} \frac{\operatorname{ch} mi}{\operatorname{sh} mn} \right]. \qquad (12.30)$$

Как следует из (12.30), и в этом случае также наибольшие напряжения возникают на секциях, ближайших к B_1 и B_2.

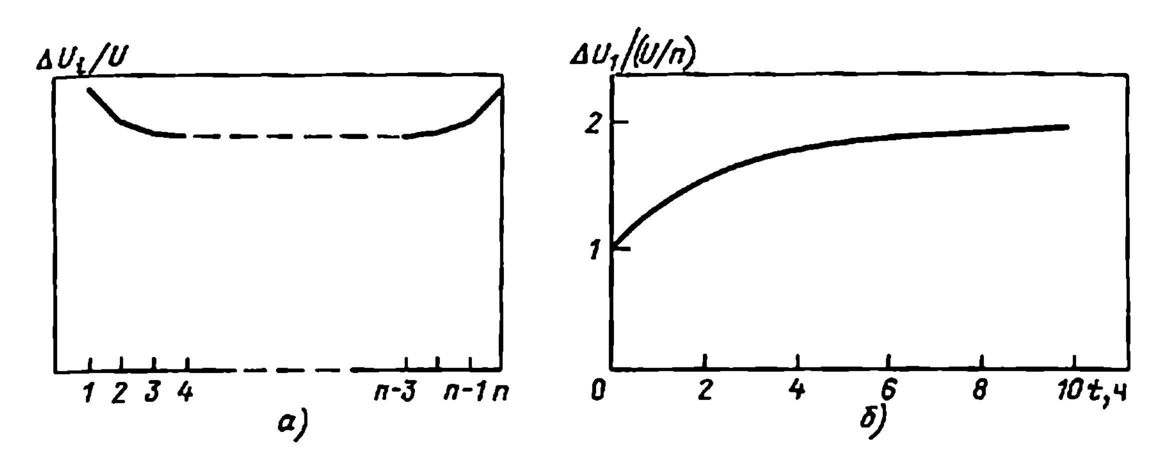


Рис. 12.7. Характерное распределение напряжения по последовательно включенным секциям в конденсаторе (*а*) и на первой секции импульсного конденсатора при длительном воздействии постоянного напряжения (*б*)

При $R_{01} \ll R_{02}$ наибольшее напряжение возникает на секции, ближайшей к B_2, а при $R_{02} \ll R_{01}$ — на секции, ближайшей к B_1. Если вывод B_1 соединен с землей или металлическим корпусом конденсатора, то утечка на корпус всегда значительно больше, чем на высоковольтный вывод ($R_{01} \ll R_{02}$), и наибольшее напряжение возникает на секции, ближайшей к выводу B_2. Характерное распределение напряжения по последовательной цепочке секций приведено на рис. 12.7, *а*.

При приложении постоянного напряжения толчком начальное распределение по секциям определяется емкостями, конечное — сопротивлениями эквивалентной схемы рис. 12.6, при этом емкостное распределение по секциям переменного напряжения всегда значительно равномернее, чем определяемое сопротивлениями распределение постоянного напряжения, так как при малом числе последовательно соединенных секций и при их значительной емкости ($C_c \gg C_{01}$ и $C_c \gg C_{02}$) емкостное распределение напряжения происходит практически равномерно. Неравномерность распределения постоянного напряжения обычно сильнее вследствие того, что утечки на корпус соизмеримы или больше, чем утечки самих секций. Перераспределение напряжения по секциям при длительном воздействии постоянного напряжения происходит относительно медленно и приблизительно определяется постоянной времени $\tau_0 = C_к R_{ут}$, где $C_к$ — емкость конденсатора; $R_{ут}$ — сопротивление изоляции пакета секций относительно корпуса. Обычно ее численное значение равно нескольким часам. Характерная зависимость изменения напряжения на первой секции импульсного конденсатора во времени при приложении постоянного напряжения приведена на рис. 12.7, *б*. Выравнивание распределения напряжения по секциям целесообразно проводить с помощью конструктивных мер, максимально снижающих утечки на корпус и линейные выводы конденсатора.

Глава тринадцатая

ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В КОНДЕНСАТОРЕ

13.1. ПОТЕРИ В КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОМ НАПРЯЖЕНИИ

Наличие потерь энергии в конденсаторе, вызывающих его нагревание, является фактором, в значительной мере влияющим на его технические и экономические характеристики. Обычно используются через мощность потерь $P_к$, которая складывается из мощности основных — в рабочем диэлектрике $P_д$ и токоведущих частях $P_м$ и дополнительных — в изоляции пакета от корпуса $P_и$ потерь:

$$P_к = P_д + P_м + P_и. \qquad (13.1)$$

Мощность потерь в активном диэлектрике при синусоидальном напряжении

$$P_д = 2\pi f C_к U^2 \operatorname{tg}\delta = Q_к \operatorname{tg}\delta, \qquad (13.2)$$

где $C_к$ — емкость конденсатора; $Q_к$ — его реактивная мощность; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла потерь диэлектрика на данной частоте.

Поделив (13.2) на объем диэлектрика, можно определить удельную мощность потерь $P_{уд}$, т. е. мощность потерь в единице объема активного диэлектрика. Выражение для удельной мощности потерь будет иметь различный вид в зависимости от того, как будет определен активный объем. Если мощность потерь в диэлектрике $P_д$ поделить на объем (за вычетом закраин) собственно активного диэлектрика, исключив объем, занимаемый обкладками, то формула для удельной мощности потерь будет иметь вид

$$P_{уд} = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r E^2 \operatorname{tg}\delta. \qquad (13.3)$$

Включая в активный объем также объем, занимаемый обкладками, получаем другой вид формулы для удельной мощности потерь:

$$P'_{уд} = 2\pi f\varepsilon_0\varepsilon_r E^2 \operatorname{tg}\delta\,[d_с/(d_с + d_ф)]. \qquad (13.4)$$

Поделив числитель и знаменатель на $d_ф$ и обозначив $d_с/d_ф = nd_1/kd_ф = \xi/k$, получим

$$P'_{уд} = 2\pi f\varepsilon_0\varepsilon_r E^2 \operatorname{tg}\delta \frac{\xi/k}{(\xi/k)+1}. \qquad (13.5)$$

Мощность потерь в конденсаторе является функцией многих параметров, одни из которых — ε_r, $C_к$, $\operatorname{tg}\delta$ — зависят от электрофизических характеристик материалов, конструктивных фа-

кторов и технологии изготовления, другие — f, E, U — от условий эксплуатации. Влияние электрофизических характеристик компонентов, технологических факторов и запрессовки на параметры, определяющие потери в конденсаторе (ε_r и $\operatorname{tg}\delta$), рассмотрены в гл. 8. Дополнительно следует отметить, что снижение потерь в бумажном диэлектрике целесообразнее производить уменьшением плотности бумаги $\gamma_б$, а не снижением коэффициента запрессовки k. При снижении $\gamma_б$ удельные характеристики снижаются медленнее, чем при снижении k при одинаковом уменьшении потерь. В процессе эксплуатации в конденсаторах имеет место необратимое увеличение $\operatorname{tg}\delta$ из-за старения диэлектрика, а также воздействия перегрузок, обусловленных повышением напряжения и появлением высших гармонических.

Потери энергии в токоведущих частях складываются из потерь в обкладках и потерь в соединительных шинах. Подробно они рассматриваются в § 13.2. Доли потерь в диэлектрике и токоведущих частях будут различными для различных типов конденсаторов. У низковольтных конденсаторов для повышения коэффициента мощности потери в диэлектрике $P_д \approx (0{,}85 \div 0{,}88) P_{осн}$, а в токоведущих частях $P_м \approx \approx (0{,}15 \div 0{,}12) P_{осн}$; в высоковольтных соответственно $P_д \approx \approx (0{,}95 \div 0{,}97) P_{осн}$ и $P_м \approx (0{,}03 \div 0{,}05) P_{осн}$. В конденсаторах, предназначенных для работы при частоте 500 Гц, распределение потерь примерно такое же, как и в низковольтных. В конденсаторах на более высокие частоты потери в токоведущих частях могут составлять 40—80% основных. В импульсных конденсаторах, используемых в установках для создания больших импульсных токов, протекающие в цепи разряда токи весьма велики и потери в токоведущих частях соизмеримы, а в ряде случаев превосходят потери в диэлектрике.

Расчет мощности потерь в изоляции пакета от корпуса аналогичен расчету ее в активном диэлектрике:

$$P_и = 2\pi f C_и U^2 \operatorname{tg}\delta_и, \qquad (13.6)$$

где $C_и$ — емкость изоляции (емкость на корпус); $\operatorname{tg}\delta_и$ — тангенс угла потерь изоляции от корпуса на данной частоте.

При включении на постоянное напряжение мощность потерь в конденсаторе будет определяться током проводимости

$$P = U^2/R_{из}, \qquad (13.7)$$

где $R_{из}$ — сопротивление изоляции диэлектрика.

Если конденсатор работает на напряжении, содержащем постоянную и переменную составляющие, то потери в нем равны сумме потерь от постоянной и переменной составляющих.

13.2. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ В ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЯХ

В секциях со скрытыми обкладками потери в них зависят от места расположения и числа токоотводов. Пусть токоотвод расположен в конце обкладки длиной $l_ф$, шириной $b_ф=b_a$ и толщиной $d_ф$ с удельным сопротивлением материала $\rho_ф$. В месте расположения токоотвода ток равен току секции I.

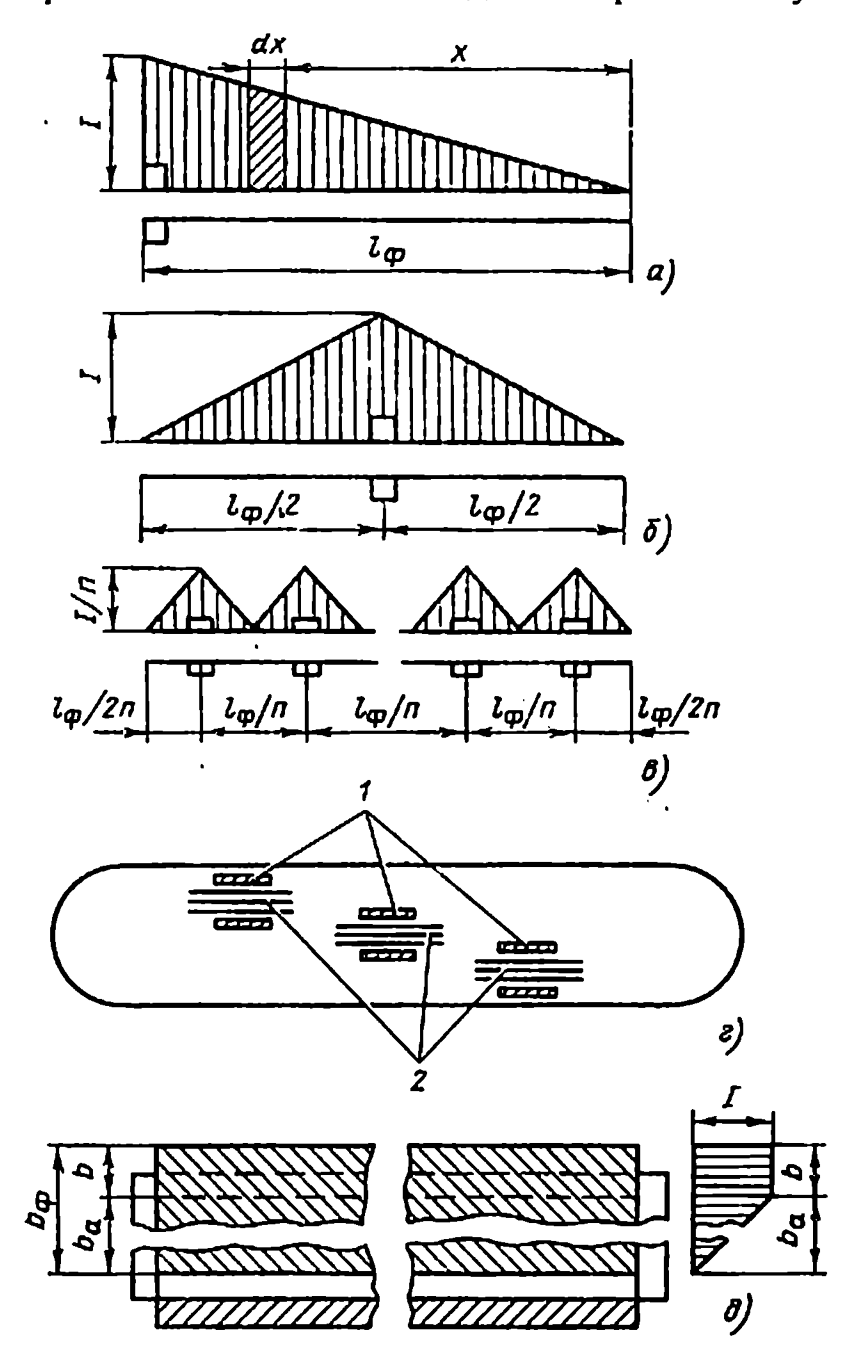


Рис. 13.1. Распределение тока при различном расположении токоотводов в секции:

1 — обкладки одной полярности; 2 — изоляционная прокладка

В начале обкладки ток равен нулю и вдоль обкладки изменяется по линейному закону (рис. 13.1,*а*). Выделим на расстоянии x элемент обкладки длиной dx. Сопротивление его $dr=\rho_\text{ф}dx/(b_\text{ф}d_\text{ф})$, и мощность потерь

$$dP'_\text{м}=I^2(x)\,dr(x)=\rho_\text{ф}I^2x^2dx/(l_\text{ф}^2b_\text{ф}d_\text{ф}).$$

Интегрируя полученное выражение по длине обкладки и удваивая результат (обкладок две), получаем мощность потерь в обкладках:

$$P'_\text{м}=2\int\limits_0^{l_\text{ф}}\rho_\text{ф}\frac{I^2x^2dx}{l_\text{ф}^2b_\text{ф}d_\text{ф}}=\frac{2}{3}\frac{\rho_\text{ф}l_\text{ф}}{b_\text{ф}d_\text{ф}}I^2. \qquad (13.8)$$

Для расположения токоотводов по рис. 13.1,*б*

$$P'_\text{м}=\rho_\text{ф}l_\text{ф}I^2/(6b_\text{ф}d_\text{ф}), \qquad (13.9)$$

и для схемы рис. 13.1,*в*

$$P'_\text{м}=\rho_\text{ф}l_\text{ф}I^2/(6n^2b_\text{ф}d_\text{ф}). \qquad (13.10)$$

Согласно формуле (13.10) при увеличении числа токоотводов в n раз уменьшаются потери в обкладках в n^2 раз. Однако в импульсных конденсаторах в секциях с широкой фольгой ($b_\text{ф}>200$ мм) это мероприятие не дает желаемого результата. Увеличение числа токоотводов не приводит к снижению индуктивности вследствие шунтирования токоотводов, удаленных от начала намотки, основными обкладками и вытеснения тока на первую пару токоотводов, расположенную в начале фольги. Поскольку большая часть тока протекает через одну пару, эффект снижения сопротивления от наличия оставшихся токоотводов существенно меньше, чем это следует из расчета по (13.10). Для уменьшения эквивалентного активного сопротивления фольги в импульсных конденсаторах необходимо обеспечить принудительное равномерное распределение тока между токоотводами, что может быть достигнуто следующими способами: 1) делением секций на несколько подсекций меньшей емкости, наматываемых отдельно и соединяемых затем параллельно; 2) делением фольги секции при намотке на несколько одинаковых частей с индивидуальными токоотводами для каждой части фольги; 3) увеличением числа пар токоотводов, равномерно распределенных по длине фольги и смещенных по торцу наматываемой секции, как это показано на рис. 13.1,*г*. Активное сопротивление можно уменьшить в равной степени всеми тремя способами. Однако индуктивность секции при втором способе в случае нерационального расположения токоотводов может значительно возрасти.

В секции с выступающей фольгой (рис. 13.1, *д*) ток отводится через торцевые части и ширина фольги $b_ф$ определяет длину пути тока, а ее длина — ширину сечения токоотвода. В этой конструкции активная ширина $b_э$ диэлектрика не совпадает с шириной фольги, как это имело место в секциях со скрытой фольгой, а отличается от $b_ф$ на ширину, равную сумме закраины и ширины выступающей части фольги. В активной части ток изменяется по линейному закону, как и в случае рис. 13.1, *а*, а в пассивной части фольги (ширина b) остается неизменным, как это схематически показано на рис. 13.1, *д*. Потери в активной части рассчитываются по формуле (13.8), а на участке b — по обычной формуле как проводника с неизменным током в нем:

$$P'_м = \frac{2}{3}\frac{3b + b_э}{b_ф d_ф}\rho_ф I^2. \qquad (13.11)$$

С повышением частоты питающего напряжения активное сопротивление токоведущих частей повышается за счет поверхностного эффекта. Мощность потерь в соединительных шинах и выводах с учетом поверхностного эффекта

$$P''_м = I^2 r k_п, \qquad (13.12)$$

где r — сопротивление проводника постоянному току; $k_п > 1$ — коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта.

При расчете потерь в обкладках влиянием поверхностного эффекта можно пренебречь ввиду его малости.

13.3. ПОТЕРИ В КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ СЛОЖНОЙ ФОРМЕ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Работа конденсаторов при периодическом несинусоидальном напряжении в ряде случаев (преобразовательные подстанции ЛЭП постоянного тока и др.) может быть их нормальным рабочим режимом. Разлагая кривую напряжения в ряд Фурье (или пользуясь разложением из справочника, например, [13.1]) и вычисляя мощность потерь в диэлектрике, получаем, что она равна сумме мощностей потерь, создаваемых каждой гармоникой:

$$P_д = \sum_{i=1}^{\infty} P_i = \sum_{i=1}^{\infty} 2\pi i f C_i U_i^2 \operatorname{tg}\delta_i, \qquad (13.13)$$

где U_i — действующее значение напряжения, а C_i и $\operatorname{tg}\delta_i$ — емкость и тангенс угла потерь на i-й гармонике.

Выражая в (13.13) U_i, C_i и $\operatorname{tg}\delta_i$ из соотношений

$$U_i/U_{ном} = m_i; \quad C_i/C = \varkappa_i; \quad \operatorname{tg}\delta_i/\operatorname{tg}\delta_0 = \gamma_i,$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение конденсаторов; C и $\mathrm{tg}\,\delta_0$ — значения их на основной частоте; заменяя $C=k_C C_{ном}$, где k_C — коэффициент, учитывающий разброс емкости (практический интерес представляет значение $k_C>1$), получаем

$$P_д=k_C 2\pi i f C_{ном} U^2_{ном} \mathrm{tg}\,\delta_0 \sum_{i=1}^{\infty} i m_i^2 \varkappa_i \gamma_i. \qquad (13.14)$$

Обычно принимается, что в диапазоне частот до 1000 Гц емкость и $\mathrm{tg}\,\delta$ не зависят от частоты, т. е. $\varkappa_i=\gamma_i=1$, и тогда для конденсаторов, работающих в промышленных сетях, приближенно можно записать

$$P_д \approx k_C P_{д.ном} S_P, \qquad (13.15)$$

где $P_{д.ном}=2\pi f C_{ном} U^2_{ном} \mathrm{tg}\,\delta_0$, $S_P=\sum_{i=1}^{\infty} i m_i^2$ — соответственно номинальная мощность потерь и коэффициент ее увеличения за счет несинусоидальности напряжения.

Действующие значения напряжения и тока с учетом принятых выше обозначений можно представить в виде

$$U=U_{ном} S_U; \qquad (13.16)$$

$$I=I_{ном} S_I, \qquad (13.17)$$

где $S_U=\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} m_i^2}$ и $S_I=\sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} (i m_i)^2}$.

При действующем значении несинусоидального напряжения, равном номинальному ($S_U=1$), имеем $S_I>1$ и $S_P>1$, т. е. ток и мощность потерь в конденсаторе выше номинальных, причем $S_I>S_P$. Это значит, что ток изменяется быстрее мощности потерь. При изменении спектрального состава напряжения так, чтобы поддерживалось $S_U=\mathrm{const}$, значения S_I и S_P не останутся неизменными. Значение S_P изменяется и при изменении кривой напряжения так, чтобы сохранялось $S_I=\mathrm{const}$.

При несинусоидальном напряжении $\mathrm{tg}\,\delta$, как показано в [13.4], не является необходимой величиной для оценки потерь. Используя изложенное в § 4.1 [формула (4.2)], для диэлектрика с одним видом релаксационной поляризации с постоянной времени τ можно найти плотность тока: $J(t)=\gamma E(t)+d\,[\varepsilon_0 E(t)+F(t)]/dt$, где γ — удельная электрическая проводимость и $E(t)=\sum_{i=1}^{\infty} E_{mi} \sin(i\omega t+\varphi_i)$, и удельные потери [13.4]:

$$p_д=\frac{1}{T}\int_0^T J(t)E(t)\,dt=\gamma\sum_{i=1}^{\infty} E_i^2+\varepsilon_0(\varepsilon_{rc}-\varepsilon_{r\infty})\sum_{i=1}^{\infty}\frac{(i\omega)^2\tau}{1+(i\omega\tau)^2}E_i^2, \qquad (13.18)$$

где E_i — действующее значение напряженности поля i-й гармоники.

Потери в (13.18) выражены через электрофизические параметры диэлектрика без использования $\operatorname{tg}\delta$.

Метод расчета потерь, учитывающий зависимость $\operatorname{tg}\delta$ конденсатора от частоты, при сложных формах воздействующего напряжения, в том числе при различных формах импульсного напряжения, предложен в [13.2, 13.3]. Схема замещения состоит из n параллельно соединенных релаксаторов, каждый из которых представляет собой последовательное соединение емкости C_i и сопротивления r_i с постоянной времени $\tau_i = r_i C_i$ (см. рис. 4.1). Эквивалентные активная и реактивная проводимости соответственно $g_i(\omega)$ и $b_i(\omega)$ каждого из n релаксаторов равны:

$$g_i(\omega) = \omega^2 \tau_i C_i / [1 + (\omega\tau_i)^2]; \quad (13.19)$$

$$b_i(\omega) = \omega C_{pi}(\omega) = \omega C_i / [1 + (\omega\tau_i)^2], \quad (13.20)$$

в которых

$$C_{pi}(\omega) = C_i [1 + (\omega\tau_i)^2] \quad (13.20а)$$

есть эквивалентная емкость i-го релаксатора по параллельной схеме замещения.

Полные активная $g(\omega)$ и реактивная $b(\omega)$ проводимости равны:

$$g(\omega) = (1/R_0) + \sum_{i=1}^{n} g_i(\omega) = \frac{1}{R_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i \omega^2 \tau_i}{1 + (\omega\tau_i)^2}; \quad (13.20б)$$

$$b(\omega) = \omega C_э = \omega C_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i(\omega) = \omega \left[C_0 + \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega C_i \tau_i}{1 + (\omega\tau_i)^2} \right]. \quad (13.20в)$$

Эквивалентная емкость схемы замещения

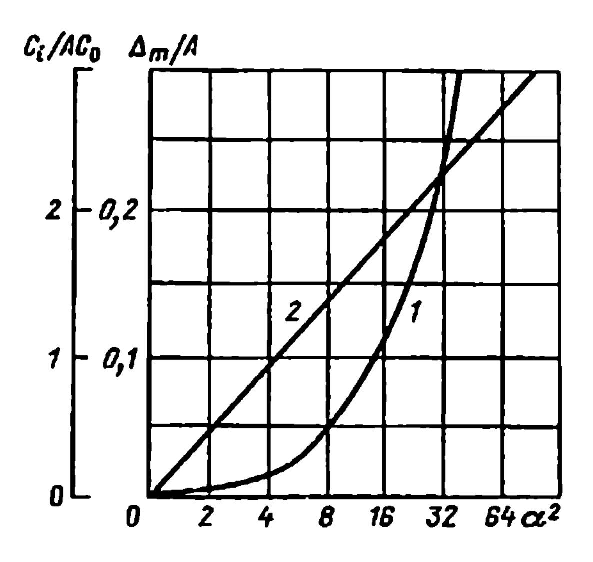
$$C_э(\omega) = C_0 + \sum_{i=1}^{n} \omega C_i \tau_i / [1 + (\omega\tau_i)^2]. \quad (13.21)$$

Параметры схемы замещения определяются обычно по экспериментальным данным: по зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от частоты; по зависимости тока саморазряда от времени; по переходной функции — реакции на единичный скачок напряжения; по зависимостям $C_э$ и $g(\omega)$ от частоты. Эти зависимости определяются при заданной температуре диэлектрика.

При $C_i \ll C_0$ используется зависимость $\operatorname{tg}\delta = f(\omega)$. Аналитическая зависимость расчетного значения $\operatorname{tg}\delta_p(\omega)$ от параметров схемы замещения имеет вид

$$\operatorname{tg}\delta_p(\omega) = \frac{1}{\omega\tau_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\omega\tau_i K_i}{1 + (\omega\tau_i)^2} = \frac{1}{\omega\tau_0} + \sum_{i=1}^{n} \frac{K_i}{\dfrac{\omega}{\omega_i} + \dfrac{\omega_i}{\omega}}, \quad (13.22)$$

Рис. 13.2. Зависимость Δ_m/A (кривая 1) и $C_i/(C_0 A)$ (кривая 2) от плотности распределения релаксаторов по частоте α^2 при $\operatorname{tg}\delta = A = \mathrm{const}$



где $\tau_0 = r_0 C_0$; $K_i = C_i/C_0$; $\omega_i = 1/\tau_i$.

Так как число релаксаторов в схеме замещения ограничено, а значения τ_i могут отличаться на несколько порядков, то параметры ее выбираются так, чтобы каждая $r_i C_i$-цепочка эквивалентировала по возможности несколько видов поляризации с близкими τ_i. Расчет $K_i = C_i/C_0$ и $\tau_i = r_i C_i$ производится с помощью минимизации отклонений экспериментальной $\operatorname{tg}\delta_э(\omega)$ и расчетной $\operatorname{tg}\delta_р(\omega)$ зависимостей:

$$\Delta = \min_{1 \leqslant i \leqslant n} \left| 1 - \frac{\operatorname{tg}\delta_р(\omega)}{\operatorname{tg}\delta_э(\omega)} \right|. \qquad (13.23)$$

Этот расчет может быть выполнен на ЭВМ. Если в зависимости $\operatorname{tg}\delta_э(\omega)$ имеется один максимум на частоте f_m, превалирующий над другими, то диэлектрик может быть заменен приближенной схемой с одним релаксатором $r_1 C_1$ и $\operatorname{tg}\delta_m$ в точке максимума связан с $K_1 = C_1/C_0$ соотношением $\operatorname{tg}\delta_m = K_1/(2\sqrt{K_1+1})$. Если в определенном диапазоне частот от ω_{max} до ω_{min} $\operatorname{tg}\delta_э(\omega) = \mathrm{const} = A$, то r_i и C_i можно определить с помощью рис. 13.2 [13.3]. По заданному значению максимальной относительной погрешности Δ_{max}/A по кривой 1 рис. 13.2 находится параметр α^2. Значения $K_i = C_i/C_0$ определяются по кривой 2 рис. 13.2 или приближенно по формуле

$$C_i/C_0 = K_i = 2{,}9 \operatorname{tg}\delta_э \lg\alpha. \qquad (13.24)$$

Необходимое число релаксаторов

$$n = E\left\{\frac{\lg\omega_{max} - \lg\omega_{min}}{2\lg\alpha}\right\} + 1, \qquad (13.25)$$

где $E(x)$ — целая часть от x.

Частоты $\omega_i = 1/\tau_i$ выбираются исходя из логарифмически равномерного распределения

$$\omega_{i+1} = \alpha^2 \omega_i. \qquad (13.26)$$

Поскольку ε_r и $\operatorname{tg}\delta$ реального диэлектрика зависят от температуры Θ, параметры R_i и C_i также зависят от Θ.

Ниже приводятся значения $\omega_i = 1/\tau_i$ и $K_i = C_i/C_0$, по которым определяются параметры релаксатором схемы замещения для наиболее широко применяемых в силовом конденсаторостроении диэлектриков.

	ПЭТФ при Θ, °C	Полипропилен при Θ, °C				КОН-2
	20	80	60	40	20	
ω_1	78,2	56,6	55,4	55,4	56,6	909
K_1, 10^{-4}	27	1,9	2,0	2,1	2,1	64
ω_2, 10	99	63,5	64,7	64,7	63,5	980
K_2, 10^{-4}	24	1,6	1,6	1,8	1,9	66
ω_3, 10^2	77,1	62,2	61	62,2	62,2	736
K_3, 10^{-4}	61	1,7	1,8	1,8	1,8	60
ω_4, 10^3	74,4	63,5	64,7	64,7	56,6	794
K_4, 10^{-4}	120	1,8	1,8	1,8	1,9	210
ω_5, 10^4	65,6	68,4	67,7	67,7	68,4	597
K_5, 10^{-4}	190	2,0	1,9	2,0	2,3	570
ω_6, 10^5	54,2	56,6	55,4	56,6	56,6	584
K_6, 10^{-4}	200	2,5	1,9	1,5	1,4	710

Примечание. Данные определены в диапазоне частот от 10 до 10^7 Гц с погрешностью 8—9% для полипропилена и от 10^2 до 10^7 с погрешностью около 5% для КОН-2 и ПЭТФ (полиэтилентерефталата).

При значениях C_i, соизмеримых с C_0, удобнее пользоваться зависимостью $g(\omega)$. В этом случае переходная характеристика $h(t)$ схемы замещения рис. 4.1 с учетом (13.19) имеет вид

$$h(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty g(\omega)\frac{\sin\omega t}{\omega}\,d\omega =$$

$$= \frac{2}{\pi}\int_0^\infty \frac{\omega^2\tau_i C_i}{1+(\omega\tau_i)^2}\frac{\sin\omega t}{\omega}\,d\omega = \exp(-t/\tau_i)/R_i. \qquad (13.27)$$

Значение $g(\omega)$ определяется по экспериментальным зависимостям $C(\omega)$ и $\operatorname{tg}\delta(\omega)$:

$$g(\omega) = \omega C_p(\omega)\operatorname{tg}\delta(\omega). \qquad (13.28)$$

Типичные зависимости $C_p(\omega)$ и $g(\omega)$ приведены на рис. 13.3.

Определение параметров релаксаторов может быть произведено также графически [13.2] по кривым $C_p(\omega)$ и $g(\omega)$. Для этого они разбиваются на m интервалов, внутри которых частота меняется на 1—2 порядка. Значения C_i и $1/R_i$ определяются как разность значений $C_p(\omega)$ и $g(\omega)$ на границах соответствующего диапазона. Значение $\tau_i = 2\pi f_i$ определяется по f_i, при котором $C_{pi}(\omega)$ уменьшается до $0{,}5C_i$ или $g(\omega)$ увеличивается от 0 до $1/(2R_i)$, так как согласно (13.20а) и (13.19) это выполняется при $\omega_i^2\tau_i^2 = 1$, откуда

$$\tau_i = 1/\omega_i = 1/2\pi f_i. \qquad (13.29)$$

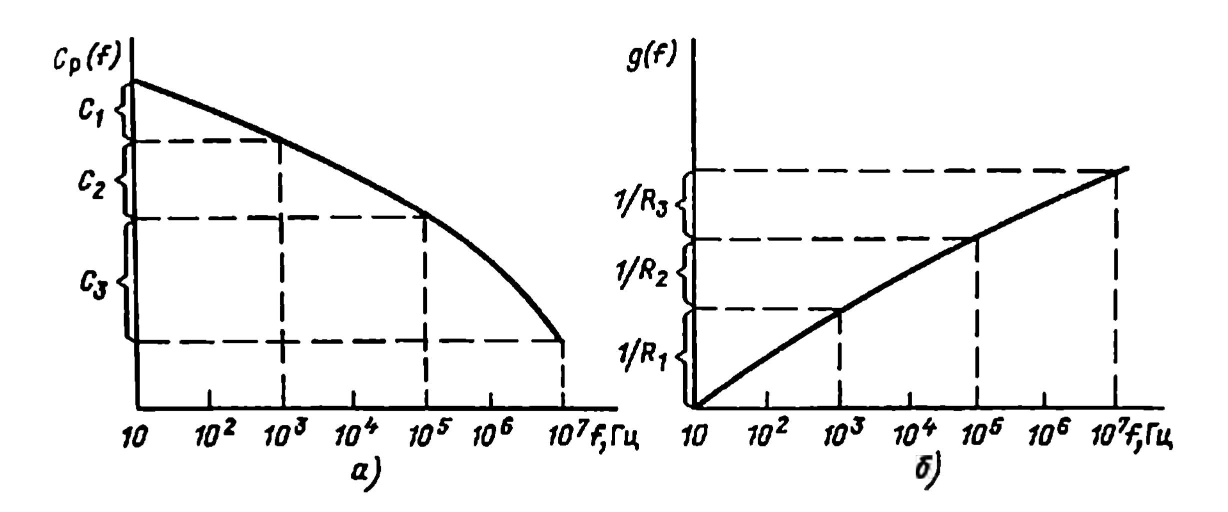


Рис. 13.3. К расчету параметров релаксаторов по зависимостям $C_p(\omega)$ (*а*) и $g(\omega)$ (*б*)

Определив C_i из рис. 13.3, *а*, для диапазона частот $\omega_i \approx 1/\tau_i$, имеем $C_{pi} \approx C_i$ и

$$r_i = \tau_i / C_i;$$

или определив g_i и R_i из рис. 13.3, *б*, для диапазона частот $\omega_i \approx 1/\tau_i$ имеем $r_i \approx R_i$ и

$$C_i = \tau_i / r_i. \qquad (13.30)$$

Потери от сквозного тока за время t при воздействии напряжения $u(t)$

$$W_{ск} = \frac{1}{R_0} \int_0^t u^2 dt. \qquad (13.31)$$

Потери в i-м релаксаторе

$$W_i = r_i \int_0^t i_i^2 dt, \qquad (13.32)$$

где i_i — мгновенное значение тока в i-м релаксаторе.

Общие потери

$$W_д = W_{ск} + \sum_{i=1}^{n} W_i. \qquad (13.33)$$

Средняя за время t мощность потерь

$$P_д = W_д / t. \qquad (13.34)$$

Так, например, при воздействии на диэлектрик конечного числа p импульсов определенной формы, следующих с частотой

повторения $f_п = 1/T_п$, средняя за время $T_п$ мощность потерь в i-м релаксаторе

$$P_i = U^2_{п.п} C_i N_{ip} / T_п, \qquad (13.35)$$

где $U_{п.п}$ — полный размах напряжения на диэлектрике и

$$N_{ip} = N_{i1} + N_{i2} N_{i3}, \qquad (13.36)$$

здесь N_{i1} и N_{i2} коэффициенты, характеризующие потери в i-м релаксаторе при данной форме импульсного напряжения соответственно в установившемся и переходном режимах; N_{i3} — коэффициент, учитывающий параметры кратковременного режима в i-м релаксаторе и не зависящий от формы импульсного напряжения [13.3]:

$$N_{i3} = \exp[-(p-1) T_п / \tau_i]. \qquad (13.37)$$

Для прямоугольных импульсов напряжения (рис. 13.4, *а*)

$$N_{i1} = \frac{[\exp(T_п - t_и)/\tau_и - 1](\exp t_и/\tau_i - 1)}{\exp(T_п/\tau_i) - 1}; \qquad (13.38)$$

$$N_{i2} = \frac{[\exp t_и/\tau_i - 1]^2}{\exp t_и/\tau_i (\exp T_п/\tau_i - 1)}. \qquad (13.39)$$

Для трапецеидальных импульсов с экспоненциальным законом изменения напряжения на фронтах (рис. 13.4, *б*) при $t_{ф1} = 3\tau_1$ и $t_{ф2} = 3\tau_2$

$$N_{i1} = \frac{3\tau_i \exp(t_и - t_{ф2})/\tau_i}{\exp(T_п/\tau_i) - 1} \left[\frac{\exp(T_п - t_и + t_{ф2})/\tau_i}{3\tau_i - t_{ф1}} - \frac{1}{3\tau_i - t_{ф2}}\right] \times$$

$$\times \left[1 - \exp\left(-\frac{t_и - t_{ф2}}{\tau_i}\right) - \frac{t_{ф1}}{3\tau_i + t_{ф1}} + \frac{3\tau_i t_{ф2} \exp(T_п - t_и + t_{ф1})/\tau_i}{(3\tau_i + t_{ф2})(\exp T_п/\tau_i - 1)}\right] \times$$

$$\times \left[\frac{1}{3\tau_i - t_{ф1}} - \frac{\exp(t_и - \tau_{ф2})/\tau_i}{3\tau_i - t_{ф2}}\right] + \frac{3\tau_i(t_{ф2} - t_{ф1})}{2(3\tau_i - t_{ф1})(3\tau_i - t_{ф2})}. \qquad (13.40)$$

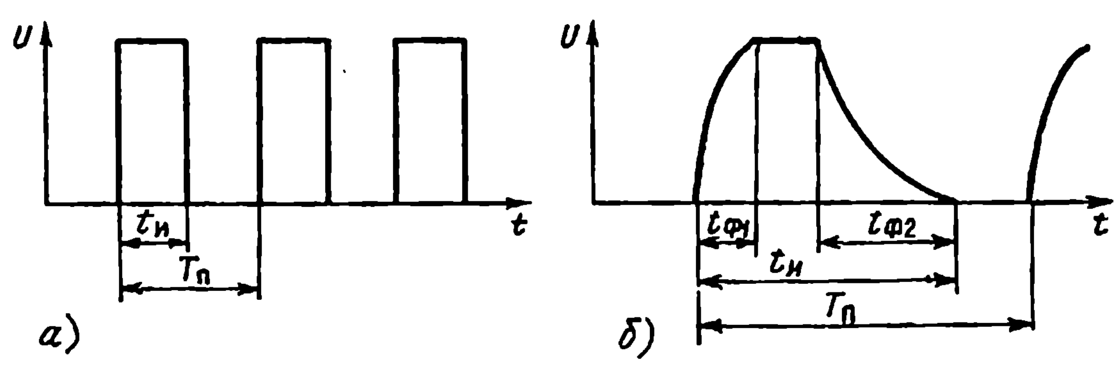


Рис. 13.4. Прямоугольные (*а*) и экспоненциально изменяющиеся импульсы (*б*)

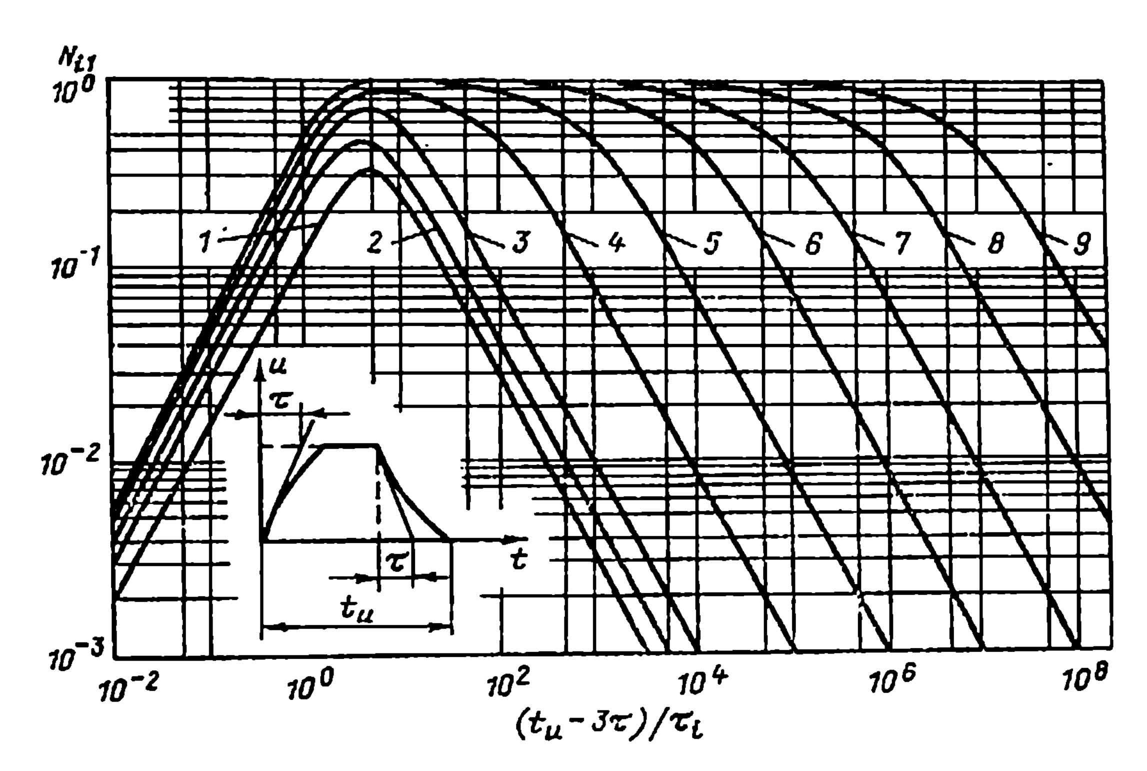


Рис. 13.5. Зависимость коэффициента N_{i1} от $(t_и-3\tau)/\tau$ (кривые 1—9) и $(t_и-3\tau)/\tau_i$ при воздействии на релаксатор трапецеидального импульсного напряжения с экспоненциально изменяющимися фронтами (τ – постоянная времени экспоненты). Для кривых 1—9 значения $(t_и-3\tau)/\tau$ соответственно равны 1, 5, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7

Зависимости коэффициента N_{i1} от $(t_и-3\tau)/\tau_i$ при $\tau_1=\tau_2=\tau$ для различных значений $(\tau_и-3\tau)/\tau_i$ приведены на рис. 13.5.

Для расчета потерь при несинусоидальном напряжении широко используются также эмпирические формулы, полученные для отдельных частных случаев. Для импульсных конденсаторов, работающих по циклу «заряд — разряд», заряжаемых от маломощного источника и разряжаемых за короткий промежуток времени, последовательность импульсов состоит из длительных зарядных и кратковременных разрядных (рис. 13.6, *а*). Ряд Фурье для этого случая имеет плохую сходимость. Улучшение сходимости достигается заменой этой последовательности двумя самостоятельными, характеризующимися одинаковой длительностью заряда и разряда (рис. 13.6, *б, в*). При этом предполагается, что потери в диэлектрике от воздействия одиночного зарядного импульса равны потерям от разрядного таких же амплитуды, формы и длительности. Потери для каждой последовательности подсчитываются отдельно по формуле

$$P_д=2\pi f_{ном} U^2_{ном}(\tau_р/T_и)\sum_{i=1}^{\infty} i m_i^2 C_i \operatorname{tg}\delta_i, \qquad (13.41)$$

где $\tau_р$ – продолжительность разряда (заряда); $T_и$ — интервал времени между импульсами [(рис. 13.6), формулы (13.13), (13.14)].

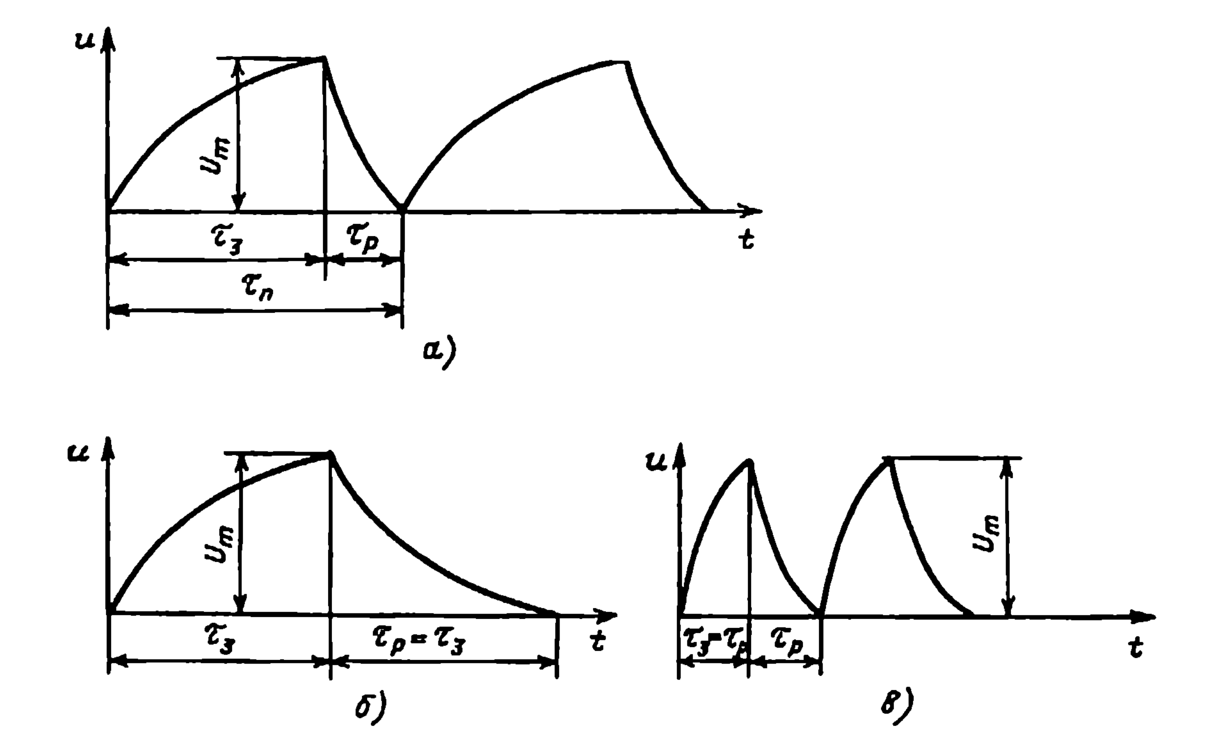


Рис. 13.6. Формы апериодических импульсов

Для импульсов с высокочастотным заполнением (рис. 13.7) потери вычисляются по формуле

$$P_д=\frac{U_m^2\omega_0 C\,\mathrm{tg}\delta}{2}\left[\frac{(2\tau_и-\tau_ф-\tau_с)^2}{4T_п^2}+\frac{0{,}18T_п^2}{(\tau_ф+\tau_с)^2}\right]. \tag{13.42}$$

Формула получена в предположении, что $\mathrm{tg}\delta$ не зависит от частоты в диапазоне учитываемых в расчете гармоник. Значение $\mathrm{tg}\delta$ берется для частоты следования импульсов $f=1/T_п$. Она дает предельное значение потерь при данной форме импульса. Фактически наблюдаемые значения будут несколько ниже.

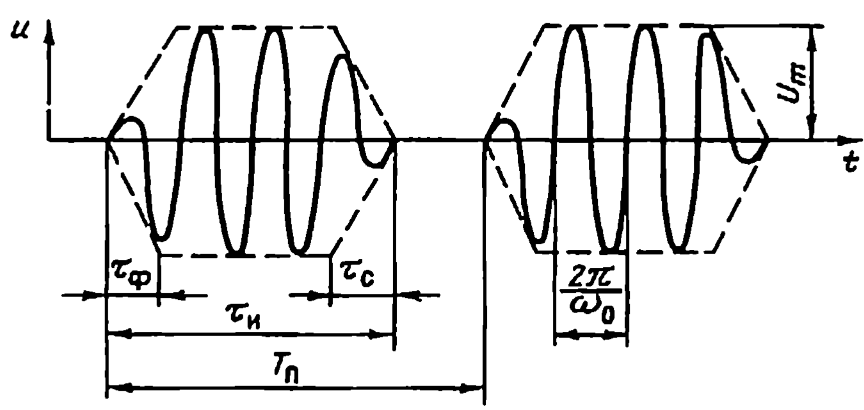


Рис. 13.7. К расчету потерь при импульсе с высокочастотным заполнением

Потери в токоведущих частях также должны определяться с учетом несинусоидальности. При сопротивлении обкладок $r_ф$ потери в них

$$P_ф = I^2 r_ф = (2\pi f_{ном} C_{ном} U_{ном})^2 r_ф S_I^2 = P_{ф ном} S_I^2, \qquad (13.43)$$

что в S_I^2 раз больше потерь при номинальном режиме.

Для других токоведущих элементов (шпильки, соединительные шины и т. д.) расчетные формулы будут аналогичными. Потери в изоляции от корпуса определяются аналогично определению потерь в диэлектрике:

$$P_и = 2\pi f_{ном} C_и U_{ном}^2 \operatorname{tg}\delta_и S_р, \qquad (13.44)$$

где $C_и$ — емкость и $\operatorname{tg}\delta_и$ — тангенс угла потерь в изоляции от корпуса.

13.4. ПОТЕРИ В КОНДЕНСАТОРЕ ПРИ СМЕШАННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Как показано выше, $\operatorname{tg}\delta$ конденсаторного диэлектрика составляется из двух компонентов: $\operatorname{tg}\delta_т$ твердой фазы, определяемого свойствами и характеристиками материалов твердой фазы, и $\operatorname{tg}\delta_ж$, определяемого свойствами пропитывающей жидкости и технологией изготовления конденсатора. При одновременном наложении на конденсатор постоянной и переменной составляющих напряжения значения $\operatorname{tg}\delta$ компонентов будут изменяться по сравнению с чисто переменным напряжением в зависимости от соотношения постоянной и переменной составляющих. Это в равной мере относится как к синусоидальной, так и к несинусоидальной составляющим.

Потери в жидкости создаются двумя составляющими: сквозным током и перемещением заряженных частиц и свободных ионов в ее прослойках между листами твердых материалов (бумага, пленка), а также внутри пор бумаги. Наложение постоянной составляющей ограничивает длину пути их перемещения, и при некотором (или большем) ее значении наступает момент, когда все свободные ионы или заряженные частицы будут прижаты к поверхности слоя твердого материала или стенкам волокна в порах бумаги, т. е. не будут перемещаться под воздействием переменной составляющей. Это означает, что составляющая потерь, обусловленная перемещением заряженных частиц и свободных ионов, наложением постоянной составляющей может быть снижена или даже доведена до нуля. Потери, обусловленные сквозным током, будут возрастать вследствие возрастания сквозного тока. Характер изменения потерь в жидкости зависит от вязкости, степени загрязнения и температуры жидкости. Потери в твердой фазе

диэлектрика конденсатора определяются главным образом потерями в бумаге, обусловленными дипольной поляризацией. При наложении постоянной составляющей диполи упруго смещаются из своего нейтрального положения в некоторое новое положение, определяемое постоянной составляющей. В этом их новом положении на колебания затрачивается большая энергия, т. е. потери в бумаге возрастают. Результирующее значение будет зависеть от соотношения потерь в компонентах и от постоянной составляющей, причем при некотором ее значении может быть достигнут минимум потерь.

Глава четырнадцатая ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОНДЕНСАТОРА

14.1. УРАВНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СИЛОВОМ КОНДЕНСАТОРЕ

Тепловой расчет является важной составной частью общего расчета силового конденсатора. При этом могут решаться две задачи. Одна, прямая, состоит в нахождении распределения температуры и точки максимального перегрева диэлектрика при заданной конструкции и свойствах материалов, другая, обратная и более сложная, состоит в том, чтобы, исходя из заданных режимов, условий эксплуатации и свойств активных материалов, определить оптимальную с точки зрения тепловых характеристик конструкцию конденсатора, обеспечивающую для данных конкретных условий экономически целесообразный ресурс при минимуме затрат. Обе задачи решаются с помощью уравнений теплообмена с граничными условиями применительно к конкретным конструкциям конденсаторов.

Подавляющее большинство конденсаторов имеют форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 14.1, *а*, *б*), большую долю внутреннего объема которого занимает пакет. В первом приближении будем рассматривать активную часть пакета O_1 с границей $Г_1$ как сплошную среду (рис. 14.1, *в*), пренебрегая наличием прокладок и холостых витков, поскольку доля их незначительна. По активному объему практически равномерно распределены внутренние источники тепла. Коэффициенты теплопроводности объема λ_x, λ_y и λ_z вдоль осей x, y и z постоянны и различны. Снаружи активный объем окружен слоем тепловой изоляции O_2 с границей $Г_2$. Теплообмен с окружающей средой осуществляется через границу $Г_2$. У конденсаторов с водяным охлаждением практически все образующееся

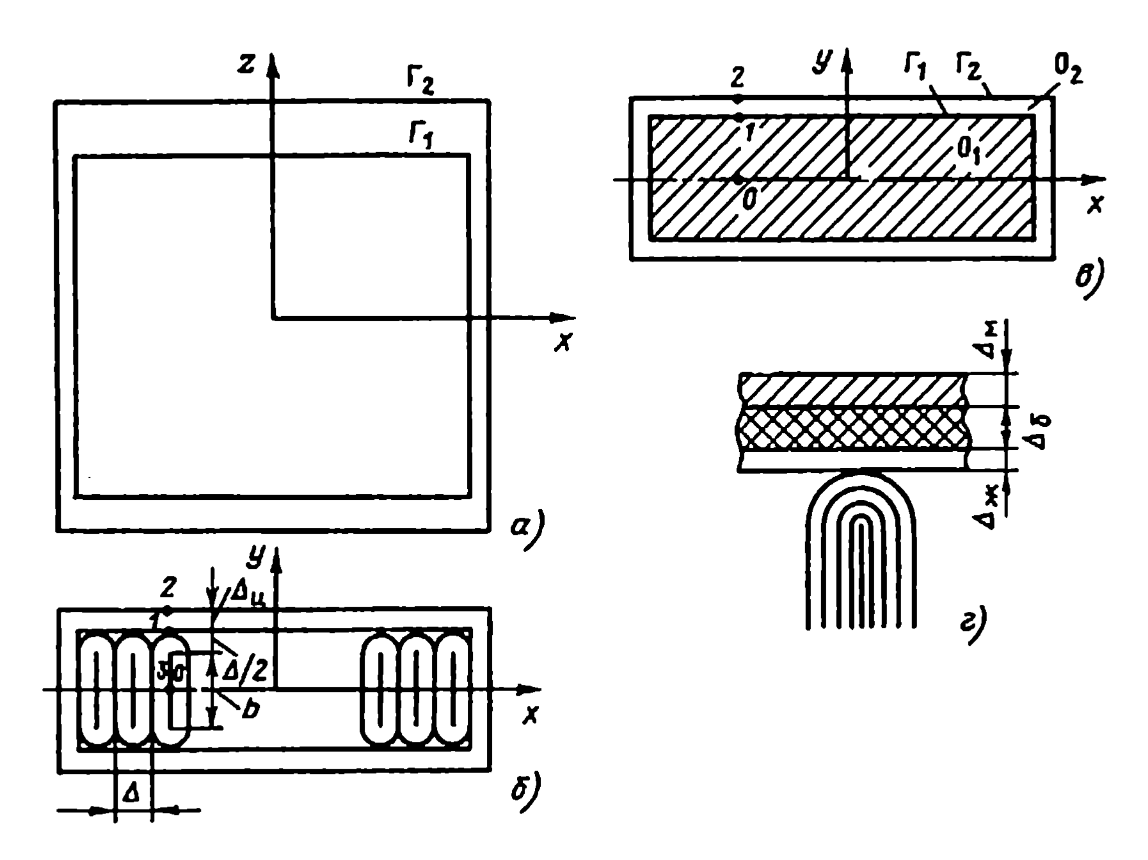


Рис. 14.1. К тепловому расчету силового конденсатора

в активном объеме тепло движется в направлении охлаждающей системы и отбирается ею. Особенности конструкции и расчета этих конденсаторов будут рассмотрены ниже. Здесь рассматривается тепловой расчет конденсаторов с воздушным охлаждением.

Пакет от корпуса обычно изолируется пропитанной кабельной бумагой. Схема изоляции показана на рис. 14.1, *г*. На рисунке обозначено: $\Delta_м$ — толщина стенки корпуса; $\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности материала корпуса; $\Delta_б$ — суммарная толщина пропитанной кабельной бумаги; $\lambda_б$ — коэффициент теплопроводности пропитанной кабельной бумаги; $\Delta_ж$ — суммарная толщина прослойки пропитывающей жидкости, $\lambda_ж$ — коэффициент теплопроводности пропитывающей жидкости. При расчетах весь этот комплекс удобнее характеризовать одним эквивалентным коэффициентом теплопроводности

$$\lambda_и = \frac{\Delta_и}{\Delta_м/\lambda_м + \Delta_б/\lambda_б + \Delta_ж/\lambda_ж}, \qquad (14.1)$$

где $\Delta_и$ — суммарная толщина эквивалентного слоя, равная полуразности внешних размеров корпуса и пакета.

Предполагается, что толщина изоляции одинакова во всех точках.

Поместим начало координат в геометрический центр корпуса, как это показано на рис. 14.1, *а*. В стационарном режиме температура Θ в активной части O_1 удовлетворяет уравнению теплопроводности в анизотропной среде

$$\lambda_x \frac{\partial^2\Theta}{\partial x^2}+\lambda_y \frac{\partial^2\Theta}{\partial y^2}+\lambda_z \frac{\partial^2\Theta}{\partial z^2}=-P_{\text{уд}}, \qquad (14.2)$$

а температура $\Theta_{\text{и}}$ в приведенном изоляционном слое — уравнению Лапласа

$$\frac{\partial^2\Theta_{\text{и}}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Theta_{\text{и}}}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Theta_{\text{и}}}{\partial z^2}=0. \qquad (14.3)$$

Картину распределения температурного поля в конденсаторе дает совместное решение уравнений (14.2) и (14.3) с учетом условий его охлаждения, выражаемых через краевые условия. Предполагается, что конденсатор находится в неограниченном пространстве и все стороны его в одинаковой мере подвержены воздействию охлаждающей среды. Тогда математически задача формулируется следующим образом: требуется найти непрерывную функцию

$$\Phi=\begin{cases}\Theta & \text{в } O_1;\\ \Theta_{\text{и}} & \text{в } O_2,\end{cases} \qquad (14.4)$$

удовлетворяющую уравнениям (14.2) и (14.3) и краевым условиям: условию теплообмена на границе Γ_2 области O_2, включающей область O_1:

$$\lambda_{\text{и}} \frac{\partial\Theta_{\text{и}}(x, y, z)}{\partial n}\pm\alpha\Theta_{\text{и}}(x, y, z)=0, \qquad (14.5)$$

где α — коэффициент теплообмена с окружающей средой, температура которой принимается равной нулю; n — нормаль к поверхности теплорассеяния в данной точке; координаты x, y, z включают границу Γ_2; условию сопряжения на границе Γ_1

$$\Theta(x, y, z)=\Theta_{\text{и}}(x, y, z); \qquad (14.6)$$

$$\lambda_x \frac{\partial\Theta(x, y, z)}{\partial x}=\lambda_{\text{и}} \frac{\partial\Theta_{\text{и}}(x, y, z)}{\partial x}; \qquad (14.7)$$

$$\lambda_y \frac{\partial\Theta(x, y, z)}{\partial y}=\lambda_{\text{и}} \frac{\partial\Theta_{\text{и}}(x, y, z)}{\partial y}; \qquad (14.8)$$

$$\lambda_z \frac{\partial\Theta(x, y, z)}{\partial z}=\lambda_{\text{и}} \frac{\partial\Theta_{\text{и}}(x, y, z)}{\partial z}. \qquad (14.9)$$

В (14.6)—(14.9) координаты x, y, z включают границу Γ_1. Распределение температуры в плоскости xy сечения симметрично относительно его центра для любого значения z, т. е.

$$\Theta(x, y) = \Theta(-x, -y). \qquad (14.10)$$

Распределение температуры в пакете по его высоте (вдоль оси z) не является симметричным относительно его центра. Причинами этого являются различная теплоотдача дна и крышки, внутренняя асимметрия конструкции, а также неодинаковость условий охлаждения нижней и верхней частей вертикальной стенки. Опытно установлено, что у реального конденсатора, стоящего на нетеплопроводящем основании, точка максимальной температуры находится по середине широкой стороны пакета на расстоянии около 2/3 его высоты, считая от основания.

Нестационарное температурное поле в конденсаторе описывается уравнением нестационарной теплопроводности. Для объема O_1 оно имеет вид

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} + P_{\text{уд}} = c_{\text{т}} \gamma \frac{\partial \Theta}{\partial t}, \qquad (14.11)$$

а для объема O_2

$$\lambda_{\text{и}} \left(\frac{\partial^2 \Theta_{\text{и}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{\text{и}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta_{\text{и}}}{\partial z^2} \right) = c_{1\text{т}} \gamma \frac{\partial \Theta_{\text{и}}}{\partial t}, \qquad (14.12)$$

где $c_{\text{т}}$ — удельная теплоемкость; γ — плотность материала; t — время. Для силового конденсатора

$$c_{\text{т}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i c_{i\text{т}}}{\sum_{i=1}^{n} m_i} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i \gamma_i c_{i\text{т}}}{\sum_{i=1}^{n} V_i \gamma_i}; \qquad (14.13)$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i \gamma_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i}, \qquad (14.14)$$

где m_i — масса; V_i — объем и γ_i — плотность i-го компонента конденсаторных материалов.

При определении $c_{\text{т}}$ и γ в (14.11) и (14.14) учитываются материалы активного объема — конденсаторная бумага или пленка, пропитывающая жидкость и фольга, а для $c_{1\text{т}}$ и γ_1 в (14.12) — материалы, образующие изоляцию пакета от корпуса и материал корпуса. Значение $P_{\text{уд}}$ в (14.11) в общем случае является функцией температуры. Распределение нестационарного температурного поля в конденсаторе следует из совместного решения (14.11) и (14.12) при краевых условиях (14.5) — (14.10) и начальном условии: при $t=0$ $\Theta = \Theta_{\text{и}} = \Theta_0$.

14.2. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Тепловая устойчивость и связанная с нею реактивная мощность в конструктивной единице зависят не только от количества выделяемого в нем тепла, но также и от характеристик путей теплоотвода, определяемых теплофизическими свойствами материалов и конструкцией конденсатора. Теплопередача внутри конденсатора происходит за счет теплопроводности. В некоторых конструкциях встречается дополнительный теплоотвод естественной конвекцией. Передача тепла охлаждающей среде в конденсаторах с естественным охлаждением происходит за счет рассеяния тепла с поверхности корпуса, а в конденсаторах с принудительным водяным охлаждением — за счет теплообмена с протекающей по охлаждающей системе охлаждающей водой.

Коэффициент теплопроводности материала λ зависит от его структуры, плотности, влажности и температуры, а для газов — также и от давления. В силовых конденсаторах влияние увлажнения от внешней среды исключается, поскольку в рабочем состоянии материалы хорошо высушены и находятся в герметично закрытом объеме, давление в котором остается практически неизменным. При работе различные участки конденсатора принимают различную температуру, что приводит к некоторому изменению λ, различному для различных материалов, в практических расчетах, однако значение λ обычно принимается постоянным и равным среднему арифметическому из λ, соответствующих предельным температурам участков диэлектрика. В расчетной практике обычно пользуются экспериментальными значениями коэффициентов теплопроводности конденсаторных материалов, в том числе и пропитанной бумаги, определяемыми в рабочем диапазоне изменениями температур конденсатора. Они несколько разнятся у отдельных авторов. Для некоторых материалов их значения приведены ниже.

Коэффициенты теплопроводности конденсаторных материалов

	Теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности, 10^{-3} Вт/(см × × °С)
Бумага непропитанная	$4{,}19 \cdot 10^3$	1,39
Бумага, пропитанная нефтяным маслом	$1{,}51 \cdot 10^3$	1,7
Бумага, пропитанная хлордифенилами	—	1,6
Гетинакс	$1{,}51 \cdot 10^3$	1,7
Фарфор электротехнический высоковольтный	$0{,}88 \cdot 10^3$	13
Винипласт	—	1,6
Пленка:		
полипропиленовая	—	2,0
полистирольная	—	1,6

лавсановая	—	2,2
из фторопласта 4	—	2,2
Масло:		
нефтяное	$1{,}78\cdot10^3$	1,5
касторовое	—	1,8
Трихлордифенил	$1{,}27\cdot10^3$	1,8
Пентахлордифенил	$1{,}1\cdot10^3$	1,01
Фольга алюминиевая	$0{,}84\cdot10^3$	2000
Медь	$0{,}38\cdot10^3$	3930
Сталь	$0{,}46\cdot10^3$	586

Для последовательного и параллельного соединений компонентов в двухкомпонентной системе (т. е. предельных структур дисперсных систем, к каким относится и конденсаторная бумага) формулы для расчета коэффициентов теплопроводности соответственно имеют вид

$$\lambda=\frac{100\lambda_2}{(100-a)\dfrac{\lambda_2}{\lambda_1}+a}; \qquad (14.15)$$

$$\lambda=\frac{100-a}{100}\lambda_1+\frac{a}{100}\lambda_2, \qquad (14.16)$$

где a — пористость системы, % (отношение объема пор к объему твердого тела); λ_1 — коэффициент теплопроводности твердой фазы материала; λ_2 — то же для жидкой или газообразной фазы.

Полагая в схеме рис. 1.3 $d_п=0$, получаем схему замещения многослойного бумажного диэлектрика. Применяя к ней (14.15) с заменой $a=1-\gamma_б/\gamma_к$; $\lambda_1=\lambda_к$ — коэффициент теплопроводности клетчатки и $\lambda_2=\lambda_ж$ — то же пропитывающей жидкости, получаем

$$\lambda=\frac{\lambda_к\lambda_ж}{\lambda_к(1-\gamma_б/\gamma_к)+\lambda_ж\gamma_б/\gamma_к}=\frac{\lambda_к\lambda_ж}{\lambda_к-(\gamma_б/\gamma_к)(\lambda_к-\lambda_ж)}. \qquad (14.17)$$

У единичного бумажного листа и особенно для бумаг пониженной плотности возможно наличие некоторого количества сквозных пор. Поэтому ни последовательная, ни параллельная схемы замещения не отражают реальной картины и не могут быть использованы для расчета коэффициентов теплопроводности. Для повышения точности расчетов предложена более сложная схема замещения, представляющая комбинацию параллельной и последовательной схем (см. рис. 5.5), аналогичная той, которая использовалась для расчета ε_r, и коэффициент теплопроводности такой системы

$$\lambda=\lambda_к V_{п.\,к}+\lambda_ж V_{п.\,ж}+(V_{с.\,ж}+V_{с.\,к})^2\lambda_к\lambda_ж/(V_{с.\,к}\lambda_ж+V_{с.\,ж}\lambda_к). \qquad (14.18)$$

Обозначения те же, что и на рис. 5.5.

14.3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКОВ СЕКЦИИ

Секции неоднородны по своим электрофизическим свойствам, и коэффициенты теплопроводности отдельных ее участков различны. Их значения определяются расположением слоев бумаги и фольги по отношению к направлению теплового потока, степенью сжатия секции, отношением толщины бумаги к толщине фольги и т. д. На пути теплового потока встречаются участки, где слои бумаги и фольги параллельны вектору теплового потока (зона параллельного теплоотвода) и где они ему перпендикулярны (зона перпендикулярного теплоотвода) (рис. 14.2, *б*). В зоне параллельного теплоотвода имеются три расположенные параллельно вектору теплового потока отводящих тепло зоны: фольга, пропитанная бумага и пропитывающая жидкость между слоями. Коэффициенты теплопроводности их соответственно $\lambda_ф$, $\lambda_б$ и $\lambda_ж$. Конвективная теплопередача в свободной жидкости отсутствует ввиду малой толщины слоя. Обозначим эквивалентный коэффициент теплопроводности параллельного теплоотвода через λ и, применяя правило вычисления коэффициента теплопроводности сложных тел с параллельным расположением компонентов, находим

$$\lambda_1=\frac{4wd_ф\lambda_ф+4wnd_1\lambda_б+4w\dfrac{1-k}{k}nd_1\lambda_ж}{4w(d_ф+nd_1/k)}, \tag{14.19}$$

где w — число витков при намотке секции.

Первый член числителя определяет теплопроводность через фольгу, второй — через пропитанную бумагу и третий — через

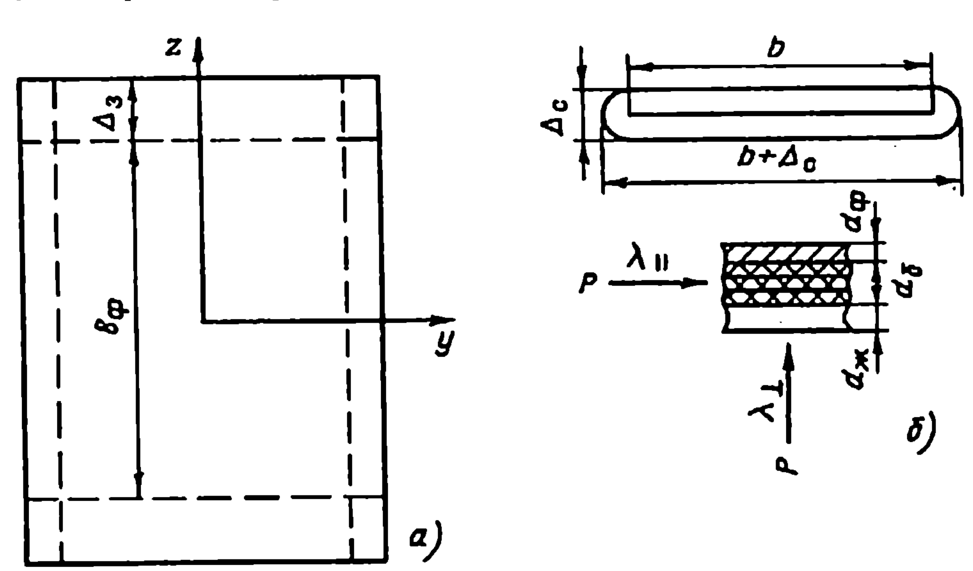


Рис. 14.2. К расчету коэффициентов теплопроводности секции

свободную пропитывающую жидкость. Учитывая, что $nd_1/d_ф = \xi$, получаем

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_ф + \left(\lambda_б + \frac{1-k}{k}\lambda_ж\right)\xi}{(\xi/k)+1}. \qquad (14.20)$$

При $k=1$

$$\lambda_\xi = (\lambda_ф + \xi\lambda_б)/(\xi+1). \qquad (14.21)$$

Для зоны перпендикулярного теплоотвода эквивалентный коэффициент теплопроводности

$$\lambda_\perp = \frac{(1+\xi/k)\lambda_ф\lambda_б\lambda_ж}{\lambda_б\lambda_ж + \xi\lambda_ф\lambda_ж + \frac{1-k}{k}\lambda_б\lambda_ф}. \qquad (14.22)$$

При $k=1$

$$\lambda_\perp = (\xi+1)\lambda_ф\lambda_б/(\lambda_б+\xi\lambda_ф). \qquad (14.23)$$

При применении (14.23) для вычисления $\lambda_\perp$ в боковых частях секции возникает дополнительная неточность, поскольку значения k в этих частях не могут строго контролироваться. Учитывая, что $\lambda_ф \gg \lambda_б$, формулы (14.20) и (14.22) можем представить в более удобном для практического применения виде:

$$\left.\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_ф/(\xi+1); \\ \lambda_\perp &= \lambda_б(\xi+1)/\xi. \end{aligned}\right\} \qquad (14.24)$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности закраины $\lambda_з$ может быть подсчитан по той же формуле, что и λ_1, но вместо $\lambda_ф$ подставляется $\lambda_ж$. При расчетах обычно принимается $\lambda_з = \lambda_б$.

На рис. 14.2, *а* приведена секция со всеми ее размерами. Поместим в геометрический центр начало координат, направив оси y и z параллельно сторонам секции. Ось x будет направлена перпендикулярно плоскости ее прессовки. Вдоль оси y теплоотвод идет сначала по участку с коэффициентом теплопроводности λ_1, а затем по участку с коэффициентом теплопроводности $\lambda_\perp$, причем $\lambda_1 \gg \lambda_\perp$. Вдоль оси z коэффициент теплопроводности равен λ_1 на всем протяжении активного объема. По оси x коэффициент теплопроводности равен $\lambda_\perp$. Используя методы теории теплопередачи, находим эквивалентный коэффициент теплопроводности вдоль оси y:

$$\lambda_э = \frac{(1+b/\Delta_c)^2}{\frac{1}{\lambda_1}\left(\frac{b}{\Delta_c}\right)^2 + \frac{4}{\pi}\frac{b}{\Delta_c}\frac{1}{\lambda_\perp} + \frac{1}{2\lambda_\perp}}. \qquad (14.25)$$

Для бумажно-пленочного диэлектрика по аналогии с вышеизложенным также могут быть получены формулы для $\lambda_\parallel$ и $\lambda_\perp$, подобные формулам (14.20) и (14.22). При допущении $\lambda_б \approx \lambda_ж \approx \lambda_п$ и $k=1$ для трехкомпонентной системы можно получить

$$\lambda_\parallel = \lambda_ф/(\xi_1+1); \tag{14.26}$$

$$\lambda_\perp = \lambda_п(\xi_1+1)/\xi_1, \tag{14.27}$$

где $\xi_1 = (nd'_1 + n'd'_1)/d_ф$. При расчете $\lambda_э$ бумажно-пленочного диэлектрика используется формула (14.25), значения $\lambda_\parallel$ и $\lambda_\perp$ в которую подставляются из (14.26) и (14.27).

Активная часть секции имеет постоянные, но различные коэффициенты теплопроводности вдоль осей координат: $\lambda_x = \lambda_\perp$; $\lambda_y = \lambda_э$; $\lambda_z = \lambda_\parallel$. Распределение их вдоль осей определяется конструкцией пакета, т. е. расположением секций в нем. Ниже приведены коэффициенты теплопроводности для трех взаимно перпендикулярных направлений теплоотвода при различных параметрах секции (w — число витков; $D_н$ — диаметр поточной оправки).

ξ	w	$D_н$, мм	$\lambda_\perp \cdot 10$ Вт/(см·°С)	$\lambda_э \cdot 10^2$	$\lambda_\parallel \cdot 10^3$
	10	40		6,13	
		100		12,26	
4			40,1		0,21
	70	40		1,23	
		100		2,59	
		40		2,78	
	10				
10		100		5,48	
			1,83		1,87
	70	40		0,66	
		100		1,24	
	10	40		0,187	
		100		3,49	
15			1,27		1,82
	70	40		0,515	
		100		0,881	

Отсюда видно, что параметры секций оказывают значительное влияние на ее коэффициенты теплопроводности.

14.4. КОЭФФИЦИЕНТЫ ТЕПЛООБМЕНА С ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Для стабильной работы конденсатора необходимо, чтобы все выделяемое в нем тепло передавалось охлаждающей среде — окружающему воздуху для конденсаторов с воздушным и воде для конденсаторов с принудительным водяным охлаждением. Параметрами, характеризующими теплообмен с охла-

ждающей средой, являются коэффициенты теплообмена. Естественное воздушное охлаждение конденсатора осуществляется за счет свободного движения охлаждающего воздуха вдоль охлаждаемой поверхности. Форма тела оказывает малое влияние на процесс теплообмена. Основное влияние оказывает протяженность поверхности, вдоль которой происходит движение охлаждающего воздуха. Процесс теплообмена с протекающей по трубе охлаждающей водой в конденсаторах с принудительным водяным охлаждением является значительно более сложным. Сложность процесса движения охлаждающей среды около стенок и обусловленная этим сложность процесса теплообмена допускают теоретическое определение коэффициента теплообмена только в немногих простейших случаях. Как правило, этот вопрос решается экспериментально. Как показывает опыт, при всех практически встречающихся режимах работы силового конденсатора теплообмен с охлаждающей средой происходит по закону Ньютона

$$P_р=\alpha_т S(\Theta_к-\Theta_0), \qquad (14.28)$$

где $P_р$ — рассеиваемая мощность; $\alpha_т$ — усредненный коэффициент теплоотдачи; S — площадь теплоотдающей поверхности; $\Theta_к$ — усредненная температура теплоотдающей поверхности корпуса; Θ_0 — температура охлаждающей среды. Коэффициент теплоотдачи является суммой коэффициентов теплоотдачи конвекцией и излучением:

$$\alpha_т=\alpha_к+\alpha_и, \qquad (14.29)$$

где $\alpha_к$ связана с физическими параметрами охлаждающей среды и размерами охлаждаемого тела соотношением

$$\mathrm{Nu}_т=c(\mathrm{Gr}\cdot\mathrm{Pr})_т^n; \qquad (14.30)$$

здесь $\mathrm{Nu}=\alpha_к l/\lambda$ — число Нуссельта для теплового подобия; $\mathrm{Gr}=\beta g\Delta\Theta l^3/\nu^2$ — число Грасгофа для механического подобия движущейся охлаждающей среды, когда разность плотностей зависит от разности температур; $\mathrm{Pr}=\nu/a$ — число Прандтля, характеризующее физические свойства охлаждающей среды; g — ускорение свободного падения; β — коэффициент объемного расширения охлаждающей среды; $\Delta\Theta=\Theta_к-\Theta_0$ — температурный напор; λ — коэффициент теплопроводности; ν — кинематическая вязкость, м^2/с; a — коэффициент температуропроводности; l — определяющий размер (для вертикальной стенки — высота, для горизонтально расположенного цилиндра — его диаметр). Физические параметры, входящие в формулу (14.30), выбираются при средней температуре

$$\Theta_т=(\Theta_к+\Theta_0)/2,$$

где $\Theta_к$ — температура охлаждаемой поверхности; Θ_0 — то же охлаждающей среды.

Постоянные c и n зависят от режима свободного движения воздуха (ламинарный, переходный или турбулентный) и являются функциями произведения GrPr:

GrPr	c	n
$1\cdot10^{-3}$—$5\cdot10^{2}$	1,18	1/8
$55\cdot10^{2}$—$2\cdot10^{7}$	0,54	1/4
$2\cdot10^{7}$—$1\cdot10^{13}$	0,135	1/3

Подставляя в (14.20) числа Нуссельта, Грасгофа и Прандтля и решая относительно $\alpha_к$, получаем

$$\alpha_к = c(\beta g \,\mathrm{Pr})^n (\Delta\Theta / l^{1/n-3})^n \lambda_т / \nu_т^{2n}, \qquad (14.31)$$

где $\Delta\Theta = \Theta_к - \Theta_0$.

Расчет начинается с вычисления GrPr, по которому из таблицы находятся значения c и n. Для воздушного охлаждения физические параметры воздуха и значение Pr берутся из справочника. Значение $\alpha_к$ зависит от $\Delta\Theta_к - \Theta_0$, которая точно неизвестна, и ее приходится оценивать ориентировочно с последующим уточнением. Все параметры подставляются в (14.31) в единицах системы СИ. Для силовых конденсаторов можно считать, что движение охлаждающего воздуха вдоль поверхности стенки корпуса является турбулентным, и для этого случая $c = 0{,}135$ и $n = 1/3$.

Коэффициент теплообмена горизонтальных теплорассеивающих плит приближенно можно рассчитывать по (14.31). В качестве определяющего размера берется меньшая сторона плиты. У теплорассеивающей поверхности, обращенной кверху, полученное значение $\alpha_к$ увеличивается на 30%, а у обращенной книзу уменьшается на 30%. Для вертикально расположенных цилиндров по [1.2]

$$\alpha_к = 5{,}88\cdot10^{-4}\,\delta(\Delta\Theta/D)^{1/4}, \qquad (14.32)$$

где D — диаметр цилиндра, мм; $\Delta\Theta$ — перепад температуры, °С; δ — коэффициент, зависящий от высоты цилиндра.

H, мм	Более 500	500	300
δ	1	1,01	1,07

Единица $\alpha_к$ — Вт/(см$^2\cdot$°С).

Коэффициент теплоотдачи излучением связан с физическими характеристиками излучающего тела, его температурой и температурой окружающей среды соотношением, следующим из закона Стефана — Больцмана:

$$\alpha_и = \frac{\varepsilon_и C_0}{T_к - T_0}\left[\left(\frac{T_к}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_0}{100}\right)^4\right], \qquad (14.33)$$

где $C_0 = 5{,}77\cdot10^{-4}$ Вт/(см$^2\cdot$°С^4) — константа излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_и$ — коэффициент теплового излучения дан-

ного тела (стенка корпуса); $T_к = 273 + \Theta_к$ — абсолютная температура излучающей стенки ($\Theta_к$ — температура °С); $T_0 = 273 + \Theta_0$ — то же окружающей среды, $\alpha_и$ в (14.33) — в Вт/(см^2 · °С).

Значения $\varepsilon_и$ тела или поверхности, которые приведены ниже, характеризуют его излучательную способность по отношению к абсолютно черному телу.

Сталь полированная	0,052—0,064
Сталь:	
вальцованная	0,7—0,8
оцинкованная	0,22—0,28
покрытая бесцветным лаком	0,87
Алюминий:	
шероховатый	0,055
полированный	0,039—0,05
Дерево	0,8—0,94
Бумага	0,8—0,95
Фарфор глазурованный	0,92—0,94
Масло	0,93
Краски масляные любых цветов	0,97—0,98
Эмали, лаки	0,85—0,95
Эмалевый лак снежно-белый	0,9
Лак черный матовый	0,97
Алюминиево-бронзовая краска	0,2—0,45
Лак бакелитовый	0,935

Параметр $\varepsilon_и$ некрашенных металлических поверхностей в очень сильной степени зависит от их состояния (полировка, шероховатость, наличие ржавчины и т. д.), и его значение намного меньше, чем у тех же поверхностей, но покрашенных. Поэтому покраска силовых конденсаторов является обязательной. Из приведенных данных видно, что для всех красок, не содержащих металлы, независимо от их цвета $\varepsilon_и \approx 0,85 \div 0,95$, и в среднем $\varepsilon_и \approx 0,9$. Объяснение этому заключается в том, что при тех температурах, при которых работают конденсаторы, максимум общего излучения лежит в далекой инфракрасной части спектра, т. е. далеко в области теплового излучения. Поэтому цвет краски не оказывает влияния на коэффициент теплоотдачи излучением. Для конденсаторов, которые при работе подвергаются прямому облучению солнечной радиацией, цвет покраски имеет существенное значение. Эти конденсаторы должны быть покрашены в светлые тона, поскольку при такой окраске хорошо отражаются солнечные лучи и практически не изменяется коэффициент теплоотдачи излучением внутреннего тепла.

Подставляя полученные выражения для $\alpha_к$ и $\alpha_и$ в (14.29), находим $\alpha_т$. Для расчета $\alpha_т$ конденсаторов с высотой корпуса 350 мм, Вт/(см^2 · °С), предложена эмпирическая формула [1.2]

$$\alpha_т = (9,5 + 0,39\Delta\Theta) \cdot 10^{-4}, \qquad (14.34)$$

которая справедлива в диапазоне $5° С \leqslant \Delta\Theta \leqslant 20° С$.

В практических расчетах в первом приближении обычно принимается $\alpha_т \approx 1 \cdot 10^{-3}$ Вт/(см$^2 \cdot$°С), и затем данные расчета уточняются экспериментально.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_т$ можно увеличить форсированием охлаждения за счет применения корпусов с дополнительными охлаждающими ребрами или их обдува. Практически более простым и удобным является применение обдува. Для вычисления коэффициента теплоотдачи в этом случае используется предложенное М. А. Михеевым уравнение

$$Nu_0 = 0{,}032\, Re_0^{0,8}, \qquad (14.35)$$

где $Re = vl/\nu$ — число Рейнольдса; v — скорость движения воздуха, м/с; ν — кинематическая вязкость воздуха; l — определяющий размер.

Значения параметров, входящих в числа Nu и Re, берутся для температуры воздуха Θ_0. Подставляя в (14.35) значения Nu и Re и решая относительно $\alpha_к$, получаем

$$\alpha_к = B_1 v^{0,8}/l^{0,2}, \qquad (14.36)$$

где $B_1 = 3{,}2 \cdot 10^{-2} \lambda/\nu^{0,8}$. Значения B_1 приведены ниже.

Θ_0, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80
B_1, 10^{-3}	9,84	9,65	9,42	9,28	9,16	8,94	9,79	8,61	8,47

В (14.36) l — в м; v — в м/с; $\alpha_к$ — в Вт/(см$^2 \cdot$°С).

Принудительное охлаждение обычно применяется для конденсаторов, устанавливаемых в батареях. Для вычисления коэффициента теплоотдачи в конденсаторах с принудительным водяным охлаждением (см. рис. 1.7, *б*) также применяются критериальные уравнения. Поскольку охлаждающая система имеет форму плоского змеевика, критериальные уравнения для которого составить затруднительно, коэффициент теплоотдачи определяется в предположении, что труба прямая, и в полученное значение вводится поправка на наличие изгибов. Связь коэффициента теплоотдачи с физическими параметрами жидкости, скоростью ее движения и диаметром трубки выражается уравнением

$$Nu_c = 2{,}3 \cdot 10^{-2}\, Re_c^{0,8}\, Pr_c^{0,4}. \qquad (14.37)$$

Индекс «с» означает, что значения физических параметров, входящих в числа, берутся для средней температуры охлаждающей жидкости, определяемой как среднее между входной и выходной температурами. За определяющий размер принимается диаметр трубки. После подстановки в (14.37) значений чисел и преобразований, принимая плотность воды равной единице, получаем

$$\alpha_к = Bv^{0,8}/d^{0,2}, \qquad (14.38)$$

где d — диаметр трубы, м; v — скорость движения, м/с.

Значения коэффициента B для воды приведены ниже.

Θ_0, °C	0	20	40	60	80
B, 10^{-4}	5,70	7,48	9,26	10,80	12,2

Полученное из (14.38) значение следует умножить на поправочный коэффициент, учитывающий наличие закруглений:

$$\xi_2 = 1 + 1{,}77 d/R, \qquad (14.39)$$

где R — радиус закругления змеевика.

Значение $\alpha_к$, определяемое из (14.38), имеет единицу Вт/(см^2·°С).

14.5. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИЛОВОМ КОНДЕНСАТОРЕ

Точное аналитическое решение уравнения теплопроводности силового конденсатора представляет значительные трудности, и поэтому обычно вводятся упрощающие допущения или оно решается численными методами. Наиболее общий метод аналитического решения задачи о распределении температуры в бесконечно высокой анизотропной призме с равномерно распределенными внутренними источниками тепла дан в [14.3]. Ниже дается сокращенное изложение этого метода.

На рис. 14.3, *а* приведено поперечное сечение призмы и расположение осей координат. В стационарном режиме распределение температуры в сечении описывается уравнением теплопроводности

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = -P_{уд}, \qquad (14.40)$$

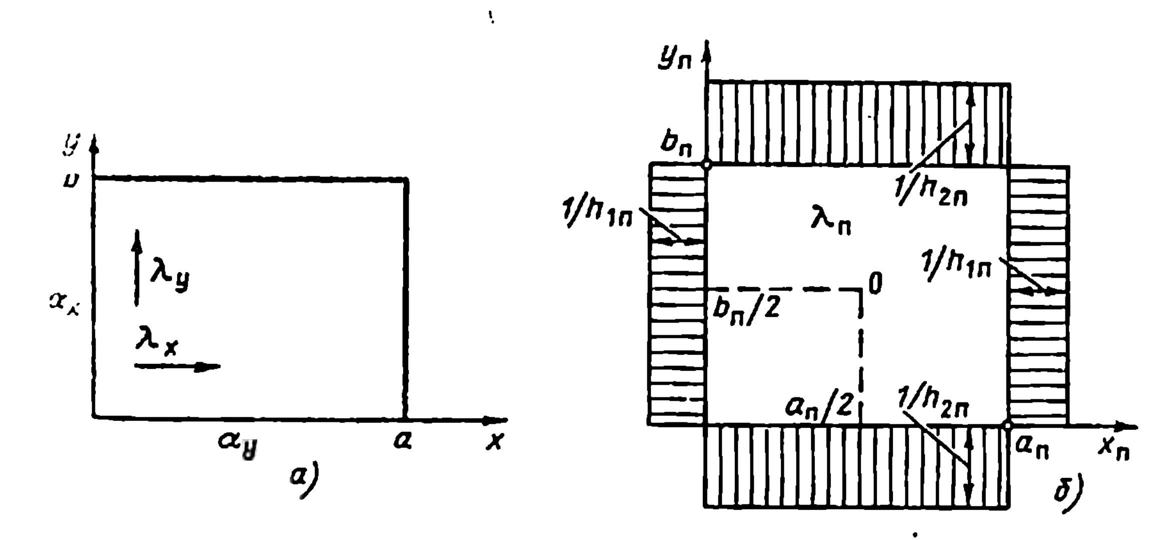


Рис. 14.3. [illegible] призмы

решение которого должно удовлетворять условиям ($\Theta_0=0$)

$$\lambda_x \frac{\partial\Theta}{\partial x}+\alpha_x\Theta=0; \qquad (14.41)$$

$$\lambda_y \frac{\partial\Theta}{\partial y}+\alpha_y\Theta=0. \qquad (14.42)$$

В дальнейшем принимается, что $P_{уд}$, λ_x, λ_y, α_x, α_y не зависят от температуры. Преобразовав рассматриваемую область в изотропную с использованием метода подобия, (14.40) можно привести к уравнению

$$\frac{\partial^2\Theta_п}{\partial x_п^2}+\frac{\partial^2\Theta_п}{\partial y_п^2}=-P_{уд.п}/\lambda_п, \qquad (14.43)$$

в котором индекс «п» показывает, что значения относятся к преобразованной области.

В качестве коэффициентов подобия принимаются

$$\left.\begin{aligned} k_x=x/x_п;\ k_y=y/y_п;\ k_p=P_{уд}/P_{уд.п};\\ k_{\lambda x}=\lambda_x/\lambda_п;\ k_{\lambda y}=\lambda_y/\lambda_п;\ k_\Theta=\Theta/\Theta_п,\end{aligned}\right\} \qquad (14.44)$$

которые считаются постоянными.

С учетом их (14.40) преобразуется к виду

$$\frac{k_{\lambda x}}{k_x^2}\lambda_п\frac{\partial^2\Theta_п}{\partial x_п^2}+\frac{k_{\lambda y}}{k_y^2}\lambda_п\frac{\partial^2\Theta_п}{\partial y_п^2}=-k_P P_{уд.п}. \qquad (14.45)$$

Процессы, описываемые (14.40), (14.43) и (14.45), будут подобными, если уравнения будут тождественными. Уравнения будут тождественными при выполнении условий

$$k_{\lambda x}/k_x^2=k_{\lambda y}/k_y^2=k_P \quad \text{или} \quad \lambda_x/k_x^2=\lambda_y/k_y^2=\lambda_п k_P, \qquad (14.46)$$

откуда следует

$$k_x=\sqrt{\lambda_x}/\sqrt{\lambda_п k_P};\ k_y=\sqrt{\lambda_y}/\sqrt{\lambda_п k_P}. \qquad (14.47)$$

Теперь для преобразованной области имеем

$$x_п=\frac{\sqrt{\lambda_п k_P}}{\sqrt{\lambda_x}}x; \qquad (14.48)$$

$$y_п=\frac{\sqrt{\lambda_п k_P}}{\sqrt{\lambda_y}}y. \qquad (14.49)$$

Краевые условия для преобразованной области

$$\lambda_п(\partial\Theta_п/\partial x_п)+\alpha_{xп}\Theta_п=0; \qquad (14.50)$$

$$\lambda_п(\partial\Theta_п/\partial y_п)+\alpha_{yп}\Theta_п=0. \qquad (14.51)$$

Принимая коэффициенты подобия

$$k_{\alpha x}=\alpha_x/\alpha_{x\text{п}};\qquad(14.52)$$

$$k_{\alpha y}=\alpha_y/\alpha_{y\text{п}}\qquad(14.53)$$

и преобразуя (14.41) и (14.42), имеем

$$\frac{k_{\lambda x}}{k_x}\lambda_\text{п}\frac{\partial\Theta_\text{п}}{\partial x_\text{п}}+k_{\alpha x}\alpha_{x\text{п}}\Theta_\text{п}=0;\qquad(14.54)$$

$$\frac{k_{\lambda y}}{k_y}\lambda_\text{п}\frac{\partial\Theta_\text{п}}{\partial y_\text{п}}+k_{\alpha y}\alpha_{y\text{п}}\Theta_\text{п}=0.\qquad(14.55)$$

Физические процессы на границе области, описываемые (14.50), (14.51), (14.54) и (14.55), будут подобны только тогда, когда соответствующие уравнения будут тождественны. Для тождественности уравнений необходимо, чтобы

$$k_{\lambda x}/k_x=k_{\alpha x};\quad k_{\lambda y}/k_y=k_{\alpha y},\qquad(14.56\text{а})$$

или

$$k_{\alpha x}=\frac{\sqrt{\lambda_x}}{\sqrt{\lambda_\text{п}}}\sqrt{k_P};\quad k_{\alpha y}=\frac{\sqrt{\lambda_y}}{\sqrt{\lambda_\text{п}}}\sqrt{k_P},\qquad(14.56\text{б})$$

и теперь для коэффициентов теплоотдачи преобразованной области следует

$$\alpha_{x\text{п}}=\frac{\sqrt{\lambda_\text{п}}}{\sqrt{\lambda_x k_P}}\alpha_x;\quad \alpha_{y\text{п}}=\frac{\sqrt{\lambda_\text{п}}}{\sqrt{\lambda_y k_P}}\alpha_y.\qquad(14.57)$$

Условия (14.46) и (14.47) могут быть выполнены при любых произвольно выбранных значениях k_P и $\lambda_\text{п}$. Их целесообразно выбрать так, чтобы координата x при преобразовании не изменилась, а коэффициент теплопроводности вдоль этой оси после преобразования был равен единице, что имеет место при

$$\lambda_\text{п}=1\ \text{ и }\ k_P=\lambda_x.\qquad(14.58)$$

Теперь параметры преобразованной области имеют вид

$$P_{\text{уд.п}}=P_\text{уд}/\lambda_x;\quad \alpha_{x\text{п}}=\alpha_x/\lambda_x;\quad \alpha_{y\text{п}}=\alpha_y/\sqrt{\lambda_x\lambda_y}.\qquad(14.59)$$

По этим же формулам производится и изотропизирующее преобразование.

На рис. 14.3, *б* показана преобразованная изотропная область для случая, когда коэффициенты теплоотдачи противоположных стенок одинаковы. Распределение температур в ней описывается уравнением (14.43) при краевых условиях

$$(\partial\Theta_\text{п}/\partial x_\text{п}\pm h_1\Theta_\text{п})_{\substack{x_\text{п}=0\\x_\text{п}=a_\text{п}}}=0;\quad h_1=\alpha_{x\text{п}}/\lambda_\text{п};\qquad(14.60)$$

$$\left(\partial\Theta_п/\partial y_п \mp h_2\Theta_п\right)_{\substack{y_п=0\\ y_п=l_п}}=0;\quad h_2=\alpha_{yп}/\lambda_п. \tag{14.61}$$

Решение (14.43) при этих условиях, которое ищется в виде произведения функций

$$\Theta_п=\sum_{i=1}^{\infty} X_i(x_п)\,Y_i(y_п), \tag{14.62}$$

имеет следующее выражение, описывающее распределение температуры в преобразованной области:

$$\Theta_п=2P_{уд.п}a_п\sum_{i=1}^{\infty}\frac{M_iN_iL_i}{m_i^2}, \tag{14.63}$$

в котором

$$M_i=\frac{\sin m_i+\frac{a_пh_1}{m_i}(1-\cos m_i)}{m_i\left[1+\left(\frac{a_пh_1}{m_i^2}\right)^2\right]+\left[1-\left(\frac{a_пh_1}{m_i}\right)^2\right]\sin m_i\cos m_i+2\frac{a_пh_1}{m_i}\sin^2 m_i}; \tag{14.64}$$

$$N_i=\frac{a_пh_1}{m_i}\sin\frac{m_ix_п}{a_п}+\cos\frac{m_ix_п}{a_п}; \tag{14.65}$$

$$L_i=K_i\,\mathrm{sh}\frac{m_iy_п}{a_i}+\left(\frac{m_i}{a_пh_2}K_i-1\right)\mathrm{ch}\frac{m_iy_п}{a_п}+1; \tag{14.66}$$

$$K_i=\frac{\frac{m_i}{a_пh_2}\,\mathrm{sh}\frac{m_ib_п}{a_п}+\mathrm{ch}\frac{m_ib_п}{a_п}-1}{\left[\left(\frac{m_i}{a_пh_2}\right)^2+1\right]\mathrm{sh}\frac{m_ib_п}{a_п}+2\frac{m_i}{a_пh_2}\,\mathrm{ch}\frac{m_ib_п}{a_п}}. \tag{14.67}$$

Значения m_i находятся графически из уравнения

$$\mathrm{ctg}\,m_i=\frac{m_i}{2a_пh_1}\left[1-\left(\frac{a_пh_1}{m_i}\right)^2\right] \tag{14.68}$$

или методом итерации по формулам

$$m_i=(i+1)\pi-2\,\mathrm{arctg}\,m_i/a_пh_1 \tag{14.69}$$

при $a_пh_1<m_i$ и

$$m_i=(i-1)\pi-2\,\mathrm{arctg}\,a_пh_1/m_i \tag{14.70}$$

при $a_пh_1>m_i$.

Максимальная температура в точке $x_п=a_п/2$ и $y_п=b_п/2$ находится по формуле

$$\Theta_{max}=2P_{уд.п}a_п^2\sum_{i=1}^{\infty}\frac{P_iQ_i}{m_i^2}, \tag{14.71}$$

в которой

$$P_i=\frac{2R_i^2\sin(m_i/2)}{H}; \qquad (14.72)$$

$$H=m_i\left[1+\left(\frac{a_п h_i}{m_i}\right)^2\right]+\sin m_i(R_i^2-S_i^2);$$

$$Q_i=1-1\Bigg/\left(\frac{m_i}{a_п n_2}\operatorname{sh}\frac{m_i b_п}{2a_п}+\operatorname{ch}\frac{m_i b_п}{2a_п}\right); \qquad (14.73)$$

$$R_i=\frac{a_п n_i}{m_i}\sin\frac{m_i}{2}+\cos\frac{m_i}{2}; \qquad (14.74)$$

$$S_i=\sin\frac{m_i}{2}-\frac{a_п n_i}{m_i}\cos\frac{m_i}{2}. \qquad (14.75)$$

Формула (14.63) позволяет рассчитать температурное поле в приведенной изотропной области. Распределение температуры в исходной анизотропной области находится после обратного преобразования координат по формулам

$$x=x_п \qquad (14.76)$$

и

$$y=\sqrt{\lambda_y/\lambda_x}\,y_п. \qquad (14.77)$$

Для определения максимального значения температуры в центре сечения обратное преобразование координат не требуется и оно может быть произведено по (14.71). В практических расчетах можно пользоваться номограммами, построенными на основе изложенного метода. Как стационарное, так и нестационарное тепловые поля силового конденсатора могут быть рассчитаны также с использованием численных методов интегрирования дифференциальных уравнений и современной вычислительной техники [13.1].

14.6. ПРИБЛИЖЕННЫЕ МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА

В основе приближенного метода теплового расчета, в разработку которого большой вклад внесли советские исследователи, лежит упрощающее допущение о том, что все выделяемое в конденсаторе тепло отводится только в направлении, перпендикулярном его боковым плоскостям. Оно близко к истине для конденсатора, стоящего на нетеплопроводящем основании. Теплоотдачей крышки можно пренебречь, так как ее большая часть занята изоляторами. Далее предполагается, что граница активной части пакета и внешняя поверхность корпуса являются изотермическими поверхностями, градиент температуры по

высоте которых (по оси z) равен нулю. Тогда распределение температуры в активной части конденсатора — на участке *0-1* (см. рис. 14.1, *б*, *в*) — описывается одномерным уравнением теплопроводности

$$\lambda_э(d^2\Theta/dy^2)+P_{уд}=0, \qquad (14.78)$$

в котором $\lambda_э$ вычисляется по (14.25), а $P_{уд}$ — по (13.3) и принимаются независимыми от температуры.

После интегрирования имеем

$$\lambda_э\Theta+P_{уд}y^2/2=A_1y+A_2. \qquad (14.79)$$

Постоянные A_1 и A_2 определяются из условия: при $y=0$ $\Theta=\Theta_{max}$ и $d\Theta/dy=0$. Это дает $A_2=\lambda_э\Theta_{max}$ и $A_1=0$, и (14.70) принимает вид

$$\Theta=\Theta_{max}-y^2P_{уд}/2\lambda_э. \qquad (14.80)$$

При $y=(b+\Delta)/2$ $\Theta=\Theta_1$, где Θ_1 — температура на границ[е] раздела активного объема от изоляции корпуса (перва[я] изотермическая поверхность). Подставляя это значени[е] y в (14.80), находим перепад температуры $\Delta\Theta_1$ в активно[й] части:

$$\Delta\Theta_1=\Theta_{max}-\Theta_1=\frac{P_{уд}}{2\lambda_э}\left(\frac{b+\Delta}{2}\right)^2. \qquad (14.81$$

Для определения температуры в приведенном изоляционно[м] слое $\Delta_и$ (участок *1-2* на рис. 14.1, *б*, *в*) введем нову[ю] переменную $y'=y-(b+\Delta)/2$ и поместим начало координа[т] в точку *1*. Распределение температуры в слое будет описыватьс[я] уравнением

$$\lambda_п d\Theta/dy'+P_{уд}(b+\Delta)/2=0, \qquad (14.82$$

и после интегрирования

$$\lambda_и\Theta+P_{уд}(b+\Delta)y'/2=A. \qquad (14.8$$

Из условия при $y'=0$ $\Theta=\Theta_1$ находим $A=\lambda_и\Theta_1$, и тепе[р]

$$\Theta=\Theta_1-P_{уд}(b+\Delta)y'/2. \qquad (14.8$$

При $y'=\Delta_и$ имеем $\Theta=\Theta_к$, где $\Theta_к$ — температура на внешн[ей] поверхности корпуса конденсатора (вторая изотермическ[ая] поверхность).

Перепад температуры $\Delta\Theta_2$ в изоляции пакета от корпу[са] составляет:

$$\Delta\Theta_2=\Theta_1-\Theta_к=P_{уд}(b+\Delta)\Delta_и/2\lambda_и. \qquad (14.8$$

Перепад температуры $\Delta\Theta_3$ от стенки корпуса к окружающ[ей] среде находится по (14.28):

$$\Delta\Theta_3=\Theta_к-\Theta_0=P_к/(\alpha_т S)=2\pi f C_к U^2 \operatorname{tg}\delta/(\alpha_т S). \quad (14.86)$$

Суммарный перепад температуры между центром секции и окружающей средой равен сумме перепадов по участкам:

$$\Delta\Theta=\Delta\Theta_1+\Delta\Theta_2+\Delta\Theta_3=\Theta_{max}-\Theta_0=P_{уд}\frac{(b+\Delta)^2}{8\lambda_э}+$$

$$+P_{уд}\frac{b+\Delta}{2\lambda_и}\Delta_и+\frac{2\pi f C_к U^2 \operatorname{tg}\delta}{\alpha_т S}. \quad (14.87)$$

Заменив в последнем слагаемом $P_к=P_{уд}V_а$, а затем поделив числитель и знаменатель на $V_а$ и обозначив $S/V_а=S_0$, которую назовем удельной теплоотводящей поверхностью, получим

$$\Theta_{max}=\Theta_0+P_{уд}\left[\frac{(b+\Delta)^2}{8\lambda_э}+\frac{b+\Delta}{2\lambda_и}\Delta_и+\frac{1}{\alpha_т S_0}\right]. \quad (14.88)$$

Из (14.88) следует, что температура в диэлектрике зависит не только от теплофизических характеристик материалов и размеров секции, но и от удельной теплоотводящей поверхности, являющейся функцией геометрии конденсатора, т. е. соотношения его размеров.

Приближенный метод теплового расчета, основанный на использовании точного решения (14.63), предложен в [14.4]. С этой целью реальный конденсатор (см. рис. 14.1, *г*) приводится к виду, показанному на рис. 14.3, *б*. Приведенный коэффициент теплоотдачи α' связан с параметрами приводимого изоляционного слоя и действительным коэффициентом теплоотдачи стенок корпуса α соотношением

$$\alpha'=\lambda_и\alpha/(\Delta_и\alpha+\lambda_и). \quad (14.89)$$

Решение (14.63) может быть использовано тогда, когда приведение сделано к активной части конденсатора (на рис. 14.1, *в* заштриховано). При приведении размеров корпуса к размерам активной части размер теплоотводящей поверхности конденсатора уменьшается. Обозначим высоту корпуса через H, ширину основания через A и его длину через B, а размеры активной части соответственно через A_1 и B_1 (высоту ее будем считать равной H). Тогда площадь боковой поверхности до приведения

$$S=2(A+B)H,$$

а после приведения

$$S_1=2(A_1+B_1)H.$$

Поскольку количество рассеиваемого тепла при приведении не изменяется, то справедливо равенство

$$S\alpha'(\Theta_к-\Theta_0)=S_1\alpha''(\Theta_к-\Theta_0), \quad (14.90)$$

где α'' — коэффициент теплоотдачи, учитывающий уменьшение теплоотводящей поверхности при приведении. Из (14.90) следует

$$\alpha'' = \alpha'(A+B)/(A_1+B_1). \qquad (14.91)$$

Этим приемом конденсатор с изоляцией пакета от корпуса (см. рис. 14.2, *в*) приведен к виду, показанному на рис. 14.3, *б*, и к нему применимо решение (14.63).

Выражение, стоящее в скобках формулы (14.88), представляет собой полное тепловое сопротивление конденсатора R_T. При условии, что коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи не зависят от температуры, оно является постоянным. В этом случае перепад температуры между наиболее нагретой точкой конденсатора и окружающей средой является линейной функцией мощности потерь:

$$\Delta\Theta = P_{уд} R_T = P_к R_T / V_п = P_к / L, \qquad (14.92)$$

где $L = V_п / R_T$ характеризует термическую проводимость конденсатора; $P_к = 2\pi f C_к U^2 \operatorname{tg}\delta$ — диэлектрические потери в нем, которым пропорционально количество тепла.

Экспериментальные данные подтверждают указанную закономерность. Умножая правую часть выражения для потерь в конденсаторе на $(C_к/C_{ном})(U/U_{ном})^2$, где индекс «ном» относится к номинальным значениям, получаем

$$P_к = 2\pi f C_{ном} U^2_{ном} (U/U_{ном})^2 (C_к/C_{ном}) \operatorname{tg}\delta = $$
$$= Q_{ном} k_u k_C \operatorname{tg}\delta, \qquad (14.93)$$

где $Q_{ном} = 2\pi f C_{ном} U^2_{ном}$ — номинальная реактивная мощность конденсатора; $k_u = (U/U_{ном})^2$ — коэффициент нагрузки конденсатора по напряжению; $k_C = C_к/C_{ном}$ — коэффициент отклонения емкости.

В (14.93) параметр $k_C \operatorname{tg}\delta = \psi$, представляющий коэффициент потерь в диэлектрике, является функцией только его температуры, причем k_u является регулируемым параметром, не зависящим от температуры. Подставляя (14.93) в (14.92), находим

$$\Delta\Theta = \frac{Q_{ном}}{L} k_u k_C \operatorname{tg}\delta = \frac{Q_{ном}}{L} k_u \psi. \qquad (14.94)$$

Отвод выделяемого тепла происходит за счет рассеяния его охлаждающей поверхностью конденсатора по закону Ньютона (14.28). Заменяя в этой формуле усредненную температуру корпуса $\Theta_к = \Theta_{max} - P_{уд} R_{Tв}$, где $R_{Tв}$ — внутреннее тепловое сопротивление конденсатора, и преобразуя, имеем количество рассеиваемого тепла

$$P_p=\frac{\alpha_т S}{1+\alpha_т S U_в / R_{Tв}}(\Theta_{max}-\Theta_0). \qquad (14.95)$$

Из (14.95) следует, что количество рассеиваемого тепла конденсатором является линейной функцией перепада температуры в нем. Тангенс угла наклона прямой

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{\alpha_т S}{1+\alpha_т S R_{Tв}/V_в}=\frac{P_p}{\Theta_{max}-\Theta_0}$$

зависит от площади боковой поверхности S и увеличивается с ее увеличением.

Полагая перепад температуры в конденсаторе равным наибольшему длительно допустимому $\Delta\Theta_{доп}$, из (14.94) имеем

$$Q_{ном}=L\Delta\Theta_{доп}/(k_u k_C \operatorname{tg}\delta). \qquad (14.96)$$

Из (14.96) видно, что увеличение $\Theta_{ном}$ может быть достигнуто за счет увеличения термической проводимости конструкции L, за счет уменьшения коэффициента колебания напряжения и за счет увеличения отношения

$$M_p=\Delta\Theta_{доп}/(k_C \operatorname{tg}\delta), \qquad (14.97)$$

которое называется показателем мощности.

Значение коэффициента потерь $k_C \operatorname{tg}\delta$ берется в точке, соответствующей максимальной длительно допустимой температуре $\Theta_{max}=\Theta_0+\Delta\Theta_{доп}$. Повышение M_p может быть достигнуто увеличением $\Delta\Theta_{доп}$, т. е. применением более нагревостойких диэлектриков, уменьшением k_C, что связано с уменьшением плюсового допуска по емкости, за счет улучшения технологии изготовления конденсатора, а также за счет уменьшения допусков по толщине листа бумаги или пленки и за счет снижения $\operatorname{tg}\delta$, что является основным путем.

14.7. ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ РАЗМЕРОВ КОНДЕНСАТОРА НА ТЕМПЕРАТУРУ ДИЭЛЕКТРИКА

Задача об оценке влияния геометрии конденсатора на его характеристики и об определении оптимальной геометрии (оптимального соотношения размеров) связана с тепловыми свойствами конденсатора и решается при его тепловом расчете. При заданных условиях объем активных материалов (бумага, пленка, фольга, пропитывающая масса активного объема) остается неизменным независимо от соотношения размеров (формы) конденсатора. Изменение его массы происходит только за счет изменения расхода материалов на внешнюю изоляцию пакета от корпуса и на корпус. С изменением соотношения размеров изменяется и боковая поверхность конденсатора.

Расход материалов на внешнюю изоляцию и корпус будет наименьшим, когда конденсатор имеет форму куба, суммарная площадь боковой поверхности которого наименьшая по сравнению с площадью боковой поверхности прямоугольного параллелепипеда равновеликого объема. Из прямоугольных параллелепипедов наименьшую площадь боковой поверхности имеет тот, основанием которого является квадрат, имеющий наименьший периметр по сравнению с прямоугольником равновеликой площади.

Согласно (14.28) количество выделенного в стационарном режиме тепла должно быть равно количеству отведенного:

$$Q_к \operatorname{tg}\delta = P_р = \alpha S(\Theta_к - \Theta_0) \tag{14.98}$$

или

$$Q_к = \alpha S(\Theta_к - \Theta_0)/\operatorname{tg}\delta. \tag{14.99}$$

Заменяя $Q_к = Q_{уд} V_а$, в общем случае получаем

$$Q_{уд} = \alpha S_0(\Theta_к - \Theta_0)/\operatorname{tg}\delta, \tag{14.100}$$

где $Q_{уд}$ характеризует степень использования диэлектрика в данной конструкции и выражается через физические характеристики материалов, геометрическую характеристику конструкции $S_0 = S/V_а$ и ее тепловую характеристику $\Theta_к$, связанную сложной зависимостью с геометрией конденсатора.

Используя принятые выше обозначения размеров конденсатора (полагая $A < B < H$), для S_0 имеем ($k_г$ — коэффициент использования объема)

$$S_0 = 2(AB + AH + BH)/(k_г ABH), \tag{14.101}$$

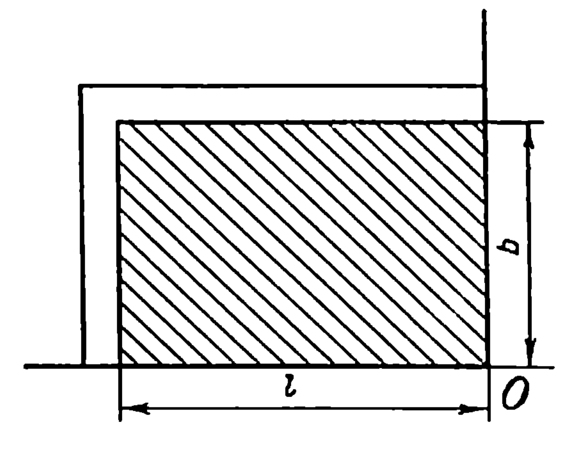
или

$$S_0 = \frac{2}{k_г}\left(\frac{1}{A} + \frac{1}{B} + \frac{1}{H}\right). \tag{14.102}$$

Из трех членов в скобке формулы (14.102) наименьший удельный вес имеет тот, знаменатель которого наибольший ($1/H$), и, наоборот, наибольший удельный вес имеет тот, знаменатель которого наименьший ($1/A$). Отсюда следует, что при увеличении наибольшего размера (H) S_0 существенно не уменьшится. Наоборот, уменьшая наименьший размер, S_0 можно увеличить более заметно, чем при уменьшении остальных.

Обычно при проектировании конденсатора наибольший интерес представляет изменение температуры наиболее нагретой точки при изменении его геометрии. Для частного случая бесконечно высокой анизотропной призмы прямоугольного сечения, окруженной слоем изотропной тепловой изоляции,

Рис. 14.4. Четверть сечения бесконечно высокой анизотропной призмы, окруженной слоем изотропной тепловой изоляции



показанной на рис. 14.4, зависимость температуры в центре сечения (точка O) от соотношения размеров, выражаемого через коэффициент $\beta=b/l$ ($\beta\leqslant 1$), приближенно может быть выражена следующей эмпирической зависимостью:

$$\Theta_ц=\Theta_{ц0}\{1-\exp[-0{,}9/(1-\beta)]\}, \qquad (14.103)$$

в которой $\Theta_{ц0}$ — температура в центре сечения при $\beta=1$.

Результаты расчета проверяются затем экспериментально на макетах конденсаторов.

14.8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Тепловые параметры конденсатора, в том числе и граница его термической устойчивости, могут быть определены также и с помощью графического решения уравнений (14.93) и (14.95). Ход решения показан на рис. 14.5. На основе экспериментальных данных по (14.93) строится кривая зависимости мощности потерь от температуры. Практически это будет кривая, близкая к температурной зависимости $\operatorname{tg}\delta$ диэлектрика. На этом же графике и в том же масштабе из точки C, соответствующей температуре Θ_0, строится прямая теплоотдачи по (14.95). Точка A пересечения графиков соответствует режиму работы

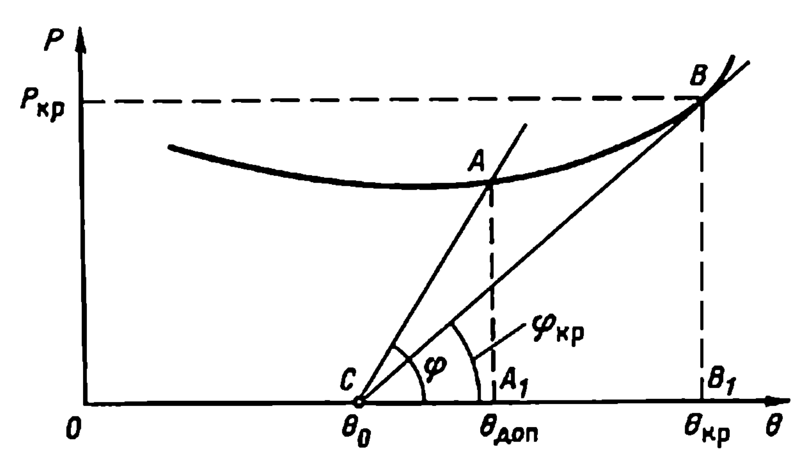


Рис. 14.5. Определение критической температуры диэлектрика

конденсатора, при котором все выделяемое в нем тепло рассеивается. Проекция точки A на ось абсцисс — точка A_1 — дает значение температуры в диэлектрике, которую представляет отрезок $\overline{0A_1}$, являющийся суммой отрезка $\overline{0C}$, представляющего температуру окружающей среды Θ_0, и отрезка $\overline{CA_1}$, представляющего температуру перегрева $\Delta\Theta$ диэлектрика по сравнению с температурой окружающей среды. Касательная, проведенная из точки C к кривой тепловыделения (точка B), дает предельную мощность потерь, которая еще может быть рассеяна данной конструкцией при данной окружающей температуре и которая называется критической $P_{кр}$. Соответствующая ей реактивная мощность называется критической реактивной мощностью. Соответствующая мощности $P_{кр}$ температура диэлектрика называется критической или температурой термической стабильности конденсатора, а угол наклона касательной — $\varphi_{кр}$ — критическим углом рассеяния. Если угол наклона прямой теплорассеяния меньше $\varphi_{кр}$, то графики тепловыделения и теплорассеяния не имеют общих точек и конденсатор не будет иметь стабильного теплового состояния. Температура в диэлектрике такого конденсатора будет непрерывно возрастать вплоть до наступления теплового пробоя. Из рис. 14.5 следует

$$\operatorname{tg}\varphi=\overline{AA_1}/\overline{CA_1}=P_к/\Delta\Theta, \tag{14.104}$$

а показатель мощности

$$M_p=\Delta\Theta/(k_C\operatorname{tg}\delta)=\overline{CA_1}/\overline{AA_1}=1/\operatorname{tg}\varphi \tag{14.105}$$

обратно пропорционален тангенсу угла наклона прямой теплоотвода.

На графическом решении уравнений тепловыделения и теплоотвода основан и другой, более универсальный метод определения тепловых характеристик конденсатора. На рис. 14.6 построена экспериментальная зависимость $\psi=k_C\operatorname{tg}\delta$ от температуры. Пусть точка E соответствует номинальной окружающей температуре $\Theta_{0\,ном}$. Проводя из нее прямую теплоотвода до пересечения ее с кривой ψ, получаем точку A. Проекция ее на ось абсцисс дает точку A', а отрезок $\overline{0A'}$ — температуру диэлектрика $\Theta_{ном}$ при номинальной реактивной мощности ($k_U=1$). Из (14.96) для этого случая получим

$$Q_{ном}=L\Delta\Theta/(k_C\operatorname{tg}\delta)=L\overline{EA'}/\overline{AA'}. \tag{14.106}$$

Проведем параллельно оси абсцисс вспомогательную прямую pq, пересекающую отрезок $\overline{AE}$ в точке A_1. Опустим из A_1 перпендикуляр на ось абсцисс и обозначим точку их пересечения через A_2. Тогда (14.106) можно представить в виде

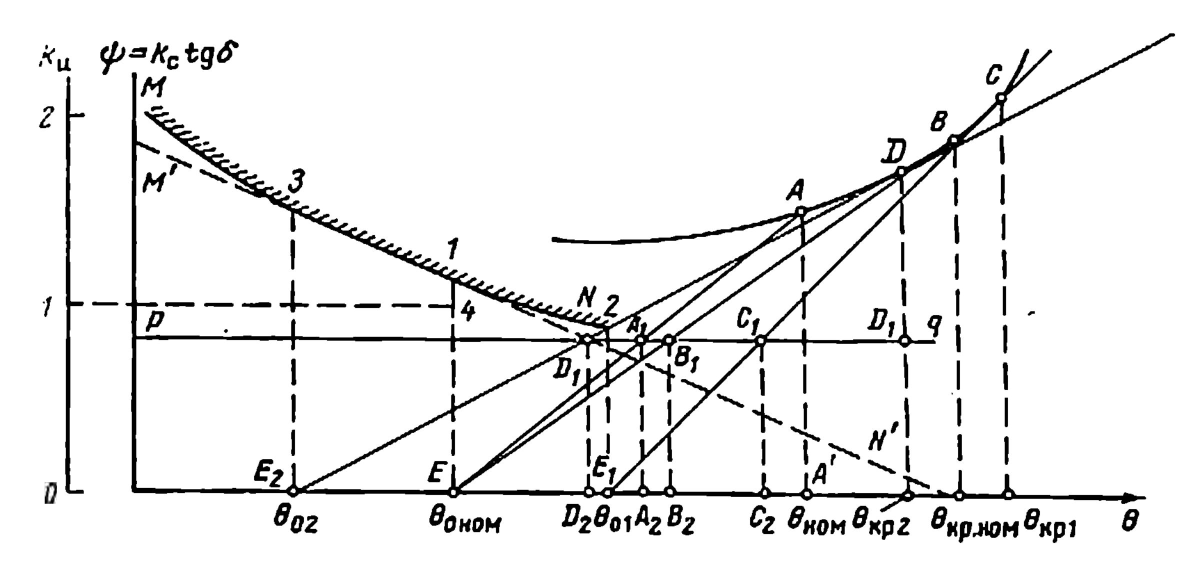


Рис. 14.6. Определение критических коэффициентов нагрузки

$$Q_{ном} = L\overline{EA_2}/\overline{A_1A_2}, \quad (14.107)$$

где L и $\overline{A_1A_2}$ являются постоянными и отрезок $\overline{EA_2}$ в определенном масштабе представляет номинальную мощность или после деления обоих частей выражения (14.107) на отрезок $\overline{0A'}$ ($\Theta_{ном}$) будет представлять коэффициент загрузки конденсатора k_U по отношению к номинальной мощности. Прямая pq проводится так, чтобы отрезок $\overline{EA_2}$ можно было удобно принять за единицу.

Для ряда окружающих температур $\Theta_{0ном}$, Θ_{01}, Θ_{02} и т. д., которым на рис. 14.6 соответствуют точки E, E_1, E_2, проводим касательные к кривой ψ соответственно в точках B, C, D, которые пересекают прямую pq в точках B_1, C_1, D_1. Опустив из них перпендикуляры до пересечения с осью абсцисс, получим точки B_2, C_2, D_2. Проведя из точек E, E_1, E_2 как из центров дуги радиусами $\overline{EB_2}$, $\overline{E_1C_2}$, $\overline{E_2D_2}$ до пересечения их с линиями ординат, соответствующими абсциссам точек E, E_1, E_2, получим точки 1—3. Соединив их линией MN, получим зависимость коэффициента загрузки k_U, соответствующую температуре термической устойчивости, от окружающей температуры. Масштаб по оси ординат получим, проведя дугу из точки E радиусом $\overline{EA_2}$ до пересечения ее с ординатой в точке 4. Отрезок $\overline{E4}$ принимается за единицу и является масштабом.

Определение коэффициентов загрузки для заданных окружающих температур, при которых температура диэлектрика не превосходит заданного значения, показано на рис. 14.7, где построение проведено для температуры диэлектрика $\Theta_{доп}$. Вначале, как и при определении критических значений k_U на

рис. 14.6, производится построение вспомогательной линии pq по номинальному режиму, что дает масштаб для последующих построений. Для заданной допустимой температуры $\Theta_{доп}$ (точка E) проводится ордината и находится точка A, из которой проводятся прямые в точки C, C_1, C_2 и т. д., соответствующие заданным окружающим температурам $\Theta_{0ном}$, Θ_{01}, Θ_{02} и т. д. Эти линии пересекут линии pq в точках $A_1 - A_4$, проекции которых на ось абсцисс дают точки $A'_1 - A'_4$. Из точек C, C_1, C_2, 0 и т. д. как из центров радиусами $\overline{CA_1}$, $\overline{C_1A_2}$, $\overline{C_2A_3}$, $\overline{0A_4}$ и т. д. проводятся дуги до пересечения их с соответствующими линиями ординат в точках *1*—*4*. Соединив эти точки, получим линию $M'N'$, выражающую зависимость коэффициента загрузки конденсатора k_U от окружающей температуры, масштаб для которой получается из построения для номинального режима. График рис. 14.7 можно использовать также и для определения температуры диэлектрика Θ_x по заданной реактивной мощности Q_x (или коэффициенту загрузки конденсатора k_{Ux}) и заданной окружающей температуре. Для этого из точки C_x, соответствующей заданной окружающей температуре Θ_{0x}, проводим ординату до пересечения ее с линией $M'N'$ в точке x''. Из точки C_x как из центра радиусом $\overline{C_x x''}$ проводим дугу до пересечения ее с осью абсцисс в точке x', из которой восстанавливается перпендикуляр до пересечения его с линией pq в точке x.

Через точки C_x и x проводится прямая C_xB до пересечения с кривой ψ (на рис. 14.7 показана пунктиром). Проекция точки B на ось абсцисс дает искомую температуру диэлектрика Θ_x.

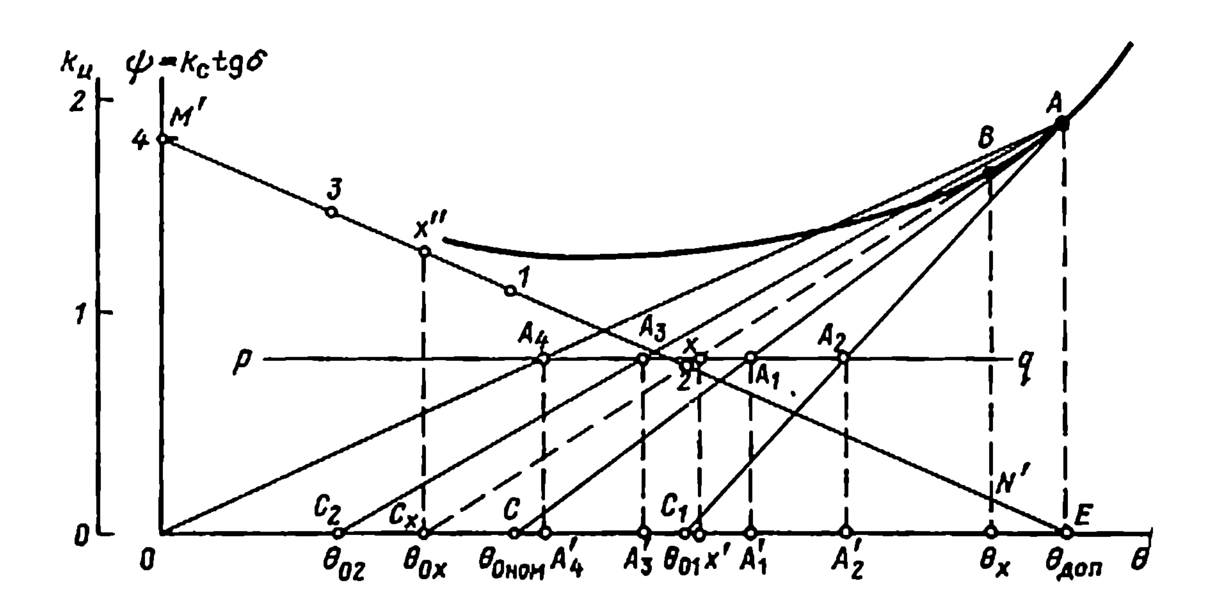


Рис. 14.7. Определение коэффициентов нагрузки, при которых температура диэлектрика не превосходит допустимую

Важной характеристикой конденсатора и диэлектрика является показатель качества

$$M_q = \Delta\Theta_{кр}/(k_C \operatorname{tg}\delta)_{кр}, \qquad (14.108)$$

где $\Delta\Theta_{кр}$ — критический перепад температуры; $(k_C \operatorname{tg}\delta)_{кр}$ — критический коэффициент потерь.

Отношение

$$\frac{M_q}{M_p} = s = \frac{\Delta\Theta_{кр}}{\Delta\Theta_{доп}} \frac{(k_C \operatorname{tg}\delta)_{доп}}{(k_C \operatorname{tg}\delta)_{кр}} \qquad (14.109)$$

называется показателем термического запаса.

Значение s может быть больше, равно или меньше единицы, что определяется качеством диэлектрика и теплоотводящей способностью конструкции конденсатора. Чем больше s, тем больше тепловая устойчивость конденсатора, т. е. чем выше кривая MN (см. рис. 14.6) располагается над прямой $M'N'$ (на рис. 14.6 показана пунктиром), тем больше s. При проектировании конденсатора нужно стремиться к тому, чтобы для заданных условий получить максимально возможное значение s.

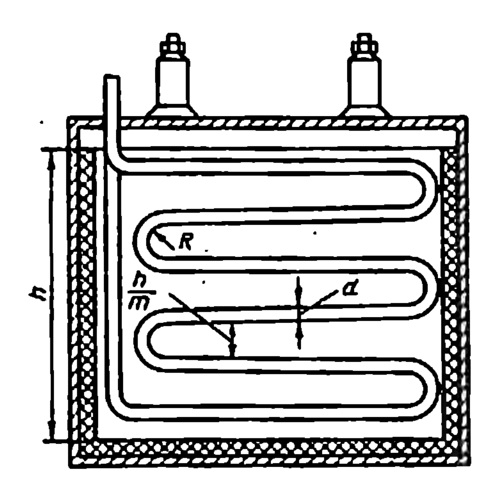
Как видно из (14.108), значение s будет тем больше, чем больше отношение $\Delta\Theta_{кр}/\Delta\Theta_{доп}$. Это отношение будет тем больше, чем больше температурная зависимость $k_C \operatorname{tg}\delta$ будет приближаться к горизонтальной прямой. Кроме того, чем ближе к единице отношение $(k_C \operatorname{tg}\delta)_{доп}/(k_C \operatorname{tg}\delta)_{кр}$, тем больше s (отношение может быть увеличено «выпрямлением» температурной зависимости $k_C \operatorname{tg}\delta$). Однако одного только «выпрямления» указанной зависимости недостаточно. Для повышения реактивной мощности в конденсаторе одновременно с этим необходимо снижать абсолютный уровень потерь в диэлектрике. Значение $s<1$ имеет место при такой температурной зависимости $\operatorname{tg}\delta$, при которой предельная длительно допустимая температура диэлектрика выше температуры термической устойчивости конденсатора. В этом случае M_p уже не характеризует допустимую мощность, и для ее оценки вводится действительный показатель мощности M_{pr}, определяемый из соотношения

$$M_{pr} = M_q/s_н, \qquad (14.110)$$

где $s_н$ — наименьшее допустимое значение показателя термического запаса, которым следует задаться.

14.9. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Особенность конструкции электротермических конденсаторов состоит в том, что практически все тепло отводится через обкладку, соединенную с охлаждающей системой. Ввиду



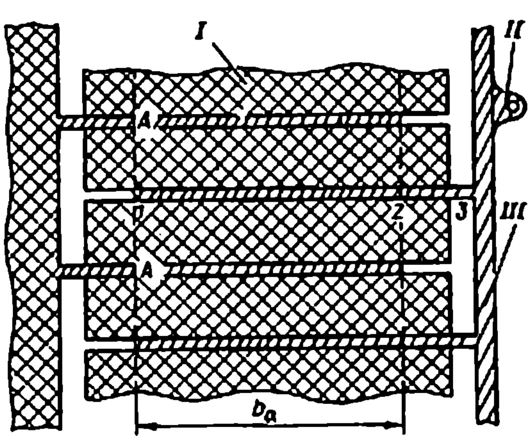


Рис. 14.8. Схема теплоотвода из электротермического конденсатора:
I — активный объем; *II* — охлаждающая трубка; *III* — слой припоя

значительного тепловыделения обкладки в них имеют толщину 16 мкм. На рис. 14.8 показаны расположение охлаждающей системы и схема отвода тепла из секции. Наиболее нагретой точкой диэлектрика будет точка *A*. Тепловой поток на пути к охлаждающей системе проходит следующие участки: а) по активному объему от точки *A* к точке *1*, создавая перепад температуры на этом участке $\Delta\Theta_a$; б) по активной части фольги от точки *1* к точке *2* — $\Delta\Theta_1$; в) по участку фольги между точками *2* и *3* — $\Delta\Theta_2$; г) по припою — от места присоединения фольги по охлаждающей трубке — $\Delta\Theta_3$; д) по переходному тепловому сопротивлению от стенки трубки к охлаждающей воде — $\Delta\Theta_ж$.

Перепад температуры на участке «а» составляет

$$\Delta\Theta_a = (nd_1/k)^2 P_{уд}/2\lambda_\perp. \qquad (14.111)$$

На участке «б» теплоотводящая обкладка является системой с распределенными источниками тепла, на 1 см^2 которой по всей ее длине b_a из диэлектрика подводится мощность $P_{уд.1} = P_{уд} nd_1/k$, выделяемая в столбике с основанием в 1 см^2 и высотой nd_1/k и создающая плотность «внешних» потерь в ней $P'_{уд.ф} = P_{уд} nd_1/kd_ф$; плотность собственных потерь в ней составляет $P''_{уд.ф} = J^2 \rho_ф d_ф$, где J — плотность тока, изменяющаяся по длине фольги, и $\rho_ф$ — удельное объемное сопротивление материала обкладки, и суммарная плотность потерь составляет

$$P_{уд.ф} = P'_{уд.ф} + P''_{уд.ф} = P_{уд}(nd_1/kd_ф) + J^2 \rho_ф d_ф.$$

Слагаемым $J^2 \rho_ф d_ф$ ввиду малости можно пренебречь, и тогда перепад температуры на этом участке

$$\Delta\Theta_1 = P_{уд.ф} b_a^2/(2\lambda_ф). \qquad (14.112)$$

Перепад на участке *2-3* фольги

$$\Delta\Theta_2 = P_{уд.ф} b_a \Delta_3 / \lambda_ф, \qquad (14.113)$$

где Δ_3 — ширина фольги между точками *2* и *3*.

Тепло, выделяемое в активном объеме диэлектрика и токоведущих частях, охлаждающей обкладкой практически равномерно подводится ко всей поверхности пакета, на которую напаивается охлаждающая система. Эта поверхность покрывается слоем припоя толщиной $\delta_п$, к каждому квадратному сантиметру которой подводится мощность $P_{уд\,1} b_a$. Охлаждающие трубки, в которых происходит теплообмен с охлаждающей жидкостью, занимают не всю поверхность пакета. Положим, что прямолинейные участки охлаждающей трубки равномерно распределены по поверхности пакета высотой h, и число их равно m. Тогда расстояние между ними

$$\Delta_п = h/m. \qquad (14.114)$$

Перепад температуры $\Delta\Theta_3$ в припое имеет место на половине расстояния между прямолинейными участками и может быть вычислен по формуле

$$\Delta\Theta_3 = \frac{P_{уд\,1} b_a}{\delta_п \lambda_п} \left(\frac{h}{2m}\right)^2, \qquad (14.115)$$

где $\lambda_п$ — коэффициент теплопроводности слоя припоя.

Перепад температуры $\Delta\Theta_ж$ на переходном сопротивлении от стенки трубки к охлаждающей воде

$$\Delta\Theta_ж = P/\alpha S_{охл}, \qquad (14.116)$$

где P — суммарные потери мощности в конденсаторе; $S_{охл}$ — поверхность, через которую происходит теплообмен с охлаждающей жидкостью; α — коэффициент теплообмена, рассчитываемый по (14.38). Общий перепад температуры равен сумме перепадов по участкам:

$$\Delta\Theta = \Theta_{max} - \Theta_{0ж} = \Delta\Theta_a + \Delta\Theta_1 + \Delta\Theta_2 + \Delta\Theta_3 + \Delta\Theta_ж, \qquad (14.117)$$

или, развертывая, получаем

$$\Theta_{max} = \Theta_{0ж} + P_{уд}\left(\frac{nd_1}{k}\right)^2 \frac{1}{2\lambda_\perp} + P_{уд.ф}\frac{b_a}{\lambda_ф}\left(\frac{b_a + 2\Delta_3}{2}\right) +$$

$$+ P_{уд}\frac{nd_1}{k}\frac{b_a}{\delta_п \lambda_п}\left(\frac{h}{2m}\right)^2 + \frac{P}{\alpha S_{охл}}, \qquad (14.118)$$

где $\Theta_{0ж}$ — температура охлаждающей воды. Данные расчета проверяются на реальных конденсаторах.

При проектировании электротермических конденсаторов следует иметь в виду, что тепловой режим этих конденсаторов является определяющим и должен быть исследован самым тщательным образом. Одновременно с этим при эксплуатации

конденсаторов необходимо особое внимание обращать на качество охлаждающей воды. Современный электротермический конденсатор имеет удельную реактивную мощность в 1 дм^3, в 4—5 раз превосходящую удельную реактивную мощность конденсатора с бумажно-пленочным диэлектриком и с воздушным охлаждением. Поэтому состояние путей теплоотвода и, главным образом, чистота внутренней поверхности теплообменной трубки имеют решающее значение. При появлении на стенке трубки вследствие применения некачественной воды осадка толщиной в несколько микрокилометров может привести к быстрому отказу конденсатора.

14.10. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА КОНДЕНСАТОРОВ С ОБКЛАДКАМИ В ВИДЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ДИЭЛЕКТРИКА

В секции с металлизированными обкладками коэффициенты теплопроводности различных участков становятся соизмеримыми друг с другом и становятся ближе к коэффициентам теплопроводности изоляционных материалов, вследствие чего теплоотвод из них ухудшается. В силу соизмеримости коэффициентов теплопроводности все направления теплоотвода становятся значимыми, и задача о тепловом расчете в этом случае становится многомерной, поскольку допущения, сделанные при тепловом расчете фольговых конденсаторов, приводят к большим погрешностям. Конкретный вид уравнения теплопроводности будет определяться конкретной конструкцией конденсатора и условиями теплообмена с окружающей средой.

Задача об определении температурного поля конденсатора с металлизированными обкладками, имеющего форму прямоугольного параллелепипеда, при трехмерном теплоотводе через все грани боковой поверхности и допущении, что направление теплоотвода перпендикулярно стенкам, температура которых различна, решена в [14.2].

14.11. НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ КОНДЕНСАТОРА

Протекание процессов нагревания и охлаждения во времени, т. е. нестационарный тепловой режим конденсатора, в ряде случаев (например, при перегрузках и т. п.) имеет важное значение.

В соответствии с (14.11) выделяемое в конденсаторе тепло $P_к$ расходуется на повышение внутренней температуры конденсатора (увеличение перегрева) и рассеивается в окружающую среду. Обозначим температуру перегрева конденсатора относительно окружающей среды через $\Delta\Theta$. Для времени dt уравнение баланса тепла имеет вид

$$P_{к}dt = c_{т}M_{к}d(\Delta\Theta) + \alpha S\Delta\Theta dt, \qquad (14.119)$$

где $c_{т}$ — удельная теплоемкость, рассчитываемая для всего конденсатора по (14.13); $M_{к}$ — масса конденсатора. Для стационарного теплового режима, когда $\Delta\Theta = \Delta\Theta_{доп}$, все выделяемое тепло рассеивается и уравнение теплового баланса имеет вид

$$P_{к} = \alpha S\Delta\Theta_{доп}. \qquad (14.120)$$

После подстановки (14.120) в (14.119) получим

$$\alpha S\Delta\Theta_{доп}dt = c_{т}M_{к}d(\Delta\Theta) + \alpha S\Delta\Theta dt. \qquad (14.121)$$

Разделим переменные:

$$\frac{d(\Delta\Theta_{доп} - \Delta\Theta)}{\Delta\Theta_{доп} - \Delta\Theta} = -\frac{\alpha S}{c_{т}M_{к}}dt. \qquad (14.122)$$

Интеграл от этого дифференциального уравнения

$$\Delta\Theta_{доп} - \Delta\Theta = A\exp(-\alpha St/c_{т}M_{к}), \qquad (14.123)$$

где A — постоянная интегрирования, определяемая из следующего условия: при $t=0$ $\Delta\Theta = 0$.

Тогда из (14.123) сследует, что $A = \Delta\Theta_{доп}$. Учитывая, что $\Delta\Theta = \Theta - \Theta_0$ и $\Delta\Theta_{доп} = \Theta'_{доп} - \Theta_0$, получаем

$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_{доп} - \Theta_0)[1 - \exp(-t/\tau)], \qquad (14.124)$$

где

$$\tau = c_{т}M_{к}/\alpha S \qquad (14.125)$$

имеет размерность времени и является постоянной времени нагрева конденсатора.

Полагая в (14.119) $P_{к} = 0$, получаем уравнение баланса тепла при охлаждении конденсатора

$$c_{т}M_{к}d(\Delta\Theta) + \alpha S\Delta\Theta dt = 0 \qquad (14.126)$$

и после разделения переменных и интегрирования получим

$$\Theta = \Theta_0 + (\Theta_{доп} - \Theta_0)\exp(-t/\tau), \qquad (14.127)$$

т. е. охлаждение конденсатора, как и его нагревание, происходит по экспоненциальному закону.

Постоянная времени τ зависит от конструкции конденсатора и в реальных конструкциях в зависимости от типа конденсатора составляет от 2,5 до 4 ч.

14.12. КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА ЖИДКОГО ДИЭЛЕКТРИКА

Жидкий диэлектрик занимает значительную часть объема конденсатора. Он работает в широком интервале изменения температур, что имеет следствием значительное изменение его

объема, и вопрос о компенсации этого изменения имеет важное значение. В конденсаторах в металлическом корпусе компенсация осуществляется за счет деформации его широких стенок. Поэтому при конструировании конденсатора размеры пакета должны быть выбраны такими, чтобы обеспечивалось беспрепятственное перемещение широких стенок при изменении объема жидкости во всем диапазоне изменения температуры внутри конденсатора. Для компенсации температурного изменения объема жидкости у конденсаторов в фарфоровых корпусах, стенки которых не деформируются, используются специальные металлические компенсаторы (расширители) мембранного типа с гофрированными стенками, показанные на рис. 14.9, *а*.

При нормальных условиях (нормальном давлении и температуре 293 К), при которых расширитель изготавливается, его стенки занимают положение *1* (рис. 14.9, *б*). В этом положении давление внутри расширителя уравновешивает давление вне его. При охлаждении расширителя до температуры T_{min}, соответствующей минимальной температуре диэлектрика, и при нормальном окружающем давлении стенки займут положение *2*, поскольку объем воздуха в нем уменьшится. Это состояние является исходным при расчетах величины компенсирующего объема. Если расширитель поместить теперь в конденсатор, температура внутри которого равна T_{max}, то вследствие увеличения объема жидкости стенки займут положение *3*, при котором материал расширителя будет находиться вблизи предела его упругой деформации, а давление достигнет предельно допустимого значения $P_{доп}$. Заштрихованный объем соответствует наибольшему допустимому объему компенсации одним расширителем, и расчет сводится к определению необходимого числа n расширителей.

Для идеального расширителя с бесконечно тонкими стенками во всем интервале рабочих температур должно соблюдаться условие

$$n \geqslant \Delta V_ж / \Delta V_р, \qquad (14.128)$$

где $\Delta V_ж$ — изменение объема жидкости; $\Delta V_р$ — то же для одного расширителя; n — число расширителей, причем

$$\Delta V_ж = V_{ж\,min} \alpha_ж (T_{max} - T_{min}), \qquad (14.129)$$

где $V_{ж\,min}$ — объем жидкости при минимальной температуре T_{min}; $\alpha_ж$ — коэффициент объемного расширения жидкости (среднее значение в интервале рабочих температур).

Изменение объема одного расширителя $\Delta V_р$ определяется из уравнения Клапейрона

$$\Delta V_р = \frac{V_{р.ном}}{293} \left(\frac{T_{min}}{P_{в\,min}} - \frac{T_{max}}{P_{в\,max}} \right), \qquad (14.130)$$

где $V_{р.ном}$ — номинальный объем расширителя; $P_{в\,min}$ и $P_{в\,max}$ — давление воздуха в расширителе, соответствующее температуре

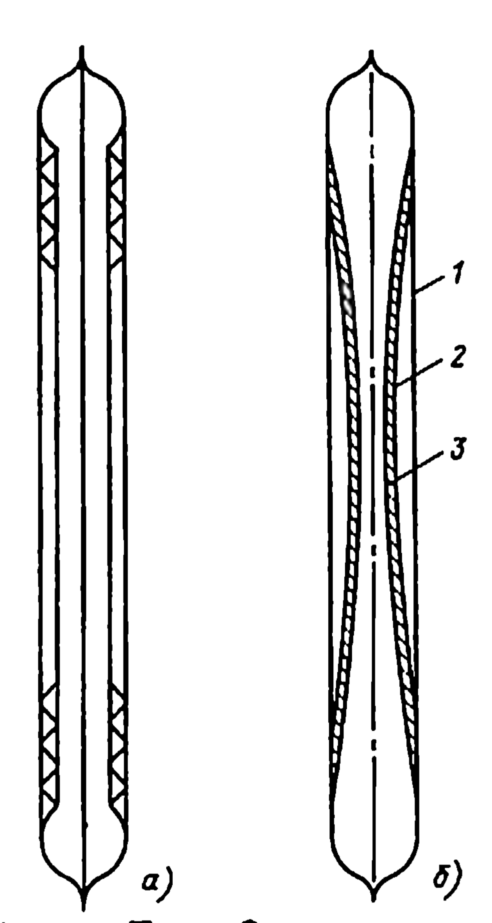


Рис. 14.9. Расширитель:
а — конструкция; *б* — схема работы

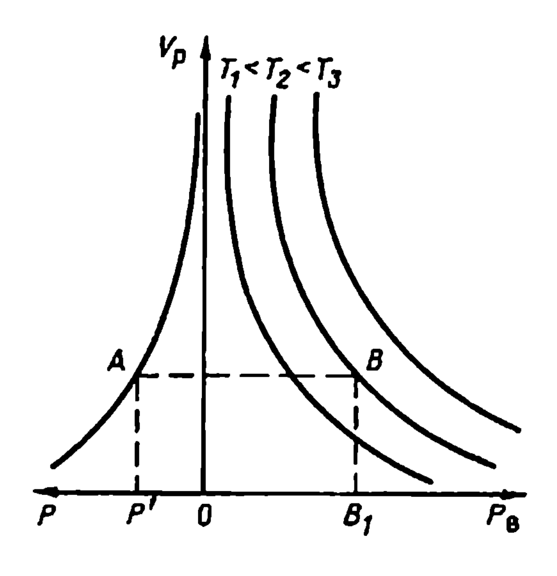


Рис. 14.10. Графическое определение $P_{в\,max}$

T_{min} и T_{max}. Оно находится экспериментально для каждой конструкции расширителя и задается обычно в виде графиков. Значение $P_{в\,max}$ есть давление воздуха в расширителе при температуре T_{max}. Определение $P_{в\,max}$ производится графически по кривым $V_р = f(P)$ и $V_р = \varphi(P_в)$, в которых P — внешнее давление на стенки расширителя или давление окружающей жидкости и $V_р$ — текущее значение объема расширителя. Давление P не должно выходить за пределы $0{,}75P_{доп} \leqslant P \leqslant P_{доп}$, где $P_{доп}$ есть допустимое значение давления внутри конденсатора. Ход определения $P_{в\,max}$ показан на рис. 14.10. Для определения давления жидкости в конденсаторе из точки P' проводим ординату до пересечения ее с кривой $V_р = f(P)$ в точке A. Через точку A проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения ее с кривой $V_р = \varphi(P_в)$ при требуемой температуре в точке B. Отрезок OB при выбранном масштабе дает искомое значение $P_{в\,max}$ или другое значение, соответствующее текущей температуре T.

Окончательное выражение для определения числа расширителей, учитывающее особенности реальных конструкций — толщину стенок, разброс характеристик и т. п., по [14.5] имеет вид

$$n > \frac{293k_п V_{ж.р}\alpha_ж (T_{max} - T_{min})}{V_{р.ном}\left(\frac{T_{min}}{P_{в\,min}} - \frac{T_{max}}{P_{в\,max}}\right) + \left(\frac{293\,V_{с.р}}{V_{р.ном}} - \frac{T_{min}}{P_{р\,min}}\right)\alpha_ж (T_{max} - T_{min})}, \quad (14.131)$$

где $1{,}05 \leq k_р \leq 1{,}2$ — коэффициент, учитывающий разброс характеристик расширителей; $V_{ж.р} = V - V_д$ — объем конденсатора, занятый жидкостью и расширителями; V — внутренний объем корпуса; $V_д$ — объем, занятый твердыми деталями; $V_{с.р}$ — объем, занимаемый стенками расширителя.

Если число расширителей известно, то может быть решена обратная задача об определении давления жидкости при любой текущей температуре. Для этого сначала находим давление воздуха в расширителе

$$P_в = T \Big/ \left[\frac{T_{min}}{P_{в\,min}} - \left(293\,\frac{1 + V_{ж.ном}}{n V_{р.ном}} - \frac{T_{min}}{P_{р\,min}}\right)\alpha_ж (T_{max} - T_{min})\right], \qquad (14.132)$$

где T — температура, при которой определяется давление; $V_{ж.ном}$ — номинальный объем жидкости при нормальных условиях.

Затем по кривым рис. 14.10 построением, обратным приведенному выше, по полученному значению $P_в$ находим искомое давление жидкости.

Из теплового расчета конденсатора можно определить напряжение, при котором наступает его тепловой пробой, или напряжение теплового пробоя, при котором наступает тепловая неустойчивость конденсатора.

Глава пятнадцатая
ИНДУКТИВНОСТЬ КОНДЕНСАТОРОВ

15.1. ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КОНДЕНСАТОРА НА РЕЖИМ ЕГО РАБОТЫ

Токоведущие конструктивные элементы конденсатора, работающего на переменном напряжении, создают его собственную или внутреннюю индуктивность. К ним относятся обкладки, токоотводы, соединительные шины, при наличии предохранителей — предохранители и выводы. При соединении конденсаторов в батареи дополнительная индуктивность создается соединяющими их шинами. Индуктивность наряду с емкостью и активным сопротивлением определяет режим работы электрической цепи. Если конденсатор имеет даже малую индуктивность, то при приближении к резонансной частоте происходит кажущееся увеличение его емкости:

$$C_э = C/(1 - 4\pi^2 f^2 LC), \qquad (15.1)$$

где $C_э$ — эффективная емкость конденсатора; C — то же действительная; f — частота; L — индуктивность.

Для силовых конденсаторов, работающих в батареях на частоте 50 Гц, их индуктивность должна учитываться при разработке мероприятий по демпфированию колебаний при включении батареи и других коммутациях. Собственная индуктивность конденсаторов связи, работающих при частотах до 300 кГц, определяет их резонансную частоту. Особое значение имеет собственная индуктивность импульсных конденсаторов.

Как правило, разряд импульсного конденсатора происходит на индуктивный контур, и в зависимости от параметров контура он может быть апериодическим или колебательным. Эквивалентная частота колебаний представляет резонансную частоту разрядной цепи, определяемую емкостью конденсатора и ее индуктивностью, составляемой индуктивностью самого контура или внешней индуктивностью и внутренней индуктивностью элементов конденсатора. В некоторых случаях от импульсного конденсатора требуется получить импульс тока с максимально крутым фронтом, на крутизну которого также влияет индуктивность. Из изложенного следует, что одной из важных задач, возникающих при проектировании импульсного конденсатора, является снижение его собственной индуктивности. Ниже рассматриваются методы расчета индуктивности элементов конденсатора. При расчетах принимается, что распределение тока по сечению обкладки является равномерным.

15.2. ИНДУКТИВНОСТЬ ОБКЛАДОК И ТОКООТВОДОВ СЕКЦИЙ

Индуктивность обкладок при условии, что токи остаются неизменными по их длине и направлены встречно друг другу (рис. 15.1), можно рассчитать как индуктивность двух параллельных шин прямоугольного сечения:

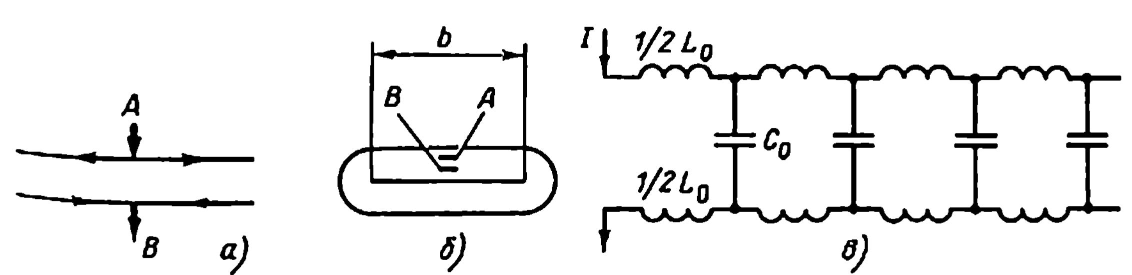


Рис. 15.1. Секция с расположением токоотводов друг под другом. A и B — выводы разной полярности:

а — схема прохождения тока; *б* — способ закладки выводов; *в* — эквивалентная схема; L_0 и C_0 — индуктивность и емкость на единицу длины обкладок

$$L=\frac{\mu_0 l_\phi}{\pi}\left[\pi\frac{3\beta-\delta}{3}-\frac{25\beta^2}{12}-\frac{\beta^4}{12}-\frac{\beta^2\delta^2}{12}+\frac{1}{12\delta^2}(\alpha^4\ln\alpha-2\beta^4\ln\beta+\right.$$

$$\left.+\gamma^4\ln\gamma-2\delta^4\ln\delta)\right], \qquad (15.2а)$$

где

$$\alpha=(2d_\phi+d_c)/b_\phi;\quad \beta=(d_\phi+d_c)/b_\phi;\quad \gamma=d_c/b_\phi;\quad \delta=d_\phi/b_\phi;$$

d_c — расчетная толщина диэлектрика; b_ϕ — ширина обкладки; d_ϕ — толщина обкладки; $\mu_0=4\pi 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная; l_ϕ — длина обкладки.

Поскольку в силовых конденсаторах $b_\phi \gg d_\phi$ и $b_\phi \gg d_c$, в (15.2а) обычно пренебрегают всеми членами, кроме первого, и тогда

$$L=\mu_0 l_\phi(2d_\phi+3d_c)/(3b_\phi). \qquad (15.2б)$$

При $d_c \gg d_\phi$

$$L=\mu_0 l_\phi d_c/b_\phi. \qquad (15.2в)$$

В реальных конденсаторах ток в обкладках, как правило, не остается неизменным (см. § 13.2) и их индуктивность будет отличаться от индуктивности, вычисленной по (15.2в). Влияние изменения тока вдоль длины обкладки можно учесть введением эквивалентной длины обкладки $l_{\phi.э}$. Под этой длиной понимается такая длина обкладки, при которой при неизменном значении тока по ее длине запасаемая в эквивалентной индуктивности энергия магнитного поля должна быть одинаковой с энергией магнитного поля, запасаемой в реальных условиях [1.5]. С введением эквивалентной длины $l_{\phi.э}$ формула (15.2в) принимает вид

$$L=\mu_0 l_{\phi.э} d_c/b_\phi. \qquad (15.3)$$

В качестве примера рассмотрим случай расположения токоотводов на одном конце обкладки (см. рис. 13.1а). Индуктивность на единицу длины обкладки находится из (15.2в): $L_{уд}=\mu_0 d_c/b_\phi$. Энергия W, запасаемая в индуктивности обкладок при разряде конденсатора на индуктивность, превышающую его собственную, с учетом линейного распределения тока вдоль обкладок

$$W=\int_0^{l_\phi}\frac{1}{2}L_{уд}I^2(x/l_\phi)^2\,dx=L_{уд}I^2 l_\phi/6, \qquad (15.4)$$

где I — наибольшее значение тока в обкладке.

Эквивалентная индуктивность $L_э=L_{уд}l_{\phi.э}$, и энергия, запасаемая в ней,

$$W_э=L_э I^2/2=L_{уд}I^2 l_{\phi.э}/2. \qquad (15.5)$$

Приравнивая друг к другу выражения (15.4) и (15.5), находим

$$l_{ф.э}=l_ф/3. \qquad (15.6)$$

Определив для каждого конкретного случая значения $l_{ф.э}$ и подставив их в (15.3), можно рассчитать индуктивность обкладок. После подстановки $l_{ф.э}$ из (15.6) в (15.3)

$$L=\mu_0 l_ф d_c/(3b_ф). \qquad (15.7)$$

При сдвиге токоотводов относительно друг друга по длине обкладки между ними возникает участок, на котором токи текут в одном направлении (рис. 15.2, *а г*). На остальных участках обкладок (за пределами токоотводов) токи направлены встречно. Индуктивность, создаваемая обкладками в этом случае, будет отличаться от индуктивности, создаваемой ими при расположении токоотводов друг над другом. На рис. 15.2, *г* через L_1 и C_1 обозначены индуктивность и емкость участков обкладок, на которых токи текут встречно, а через L_2 и C_2 — индуктивность и емкость участка l_{AB} между сдвинутыми токоотводами, где токи в обкладках имеют одинаковое направление. Емкость этого участка представлена двумя конденсаторами $C_2/2$. Индуктивность L_1 при наличии сдвига токоотводов симметрично относительно середины секции рассчитывается по (15.2б), в которой вместо $l_ф$ имеем $l_{ф1}=\frac{1}{2}(l_ф-l_{AB})\approx l_ф/2$. Индуктивность L_2 будет определяться сдвигом токоотводов.

При сдвиге токоотводов по длине обкладки в пределах ширины секции (рис. 15.2, *б*)

$$L_2=\frac{\mu_0 l_{AB}}{2\pi}\left(\ln\frac{2l_{AB}}{b_ф}+\frac{1}{2}\right). \qquad (15.8)$$

Если токоотводы сдвинуты относительно друг друга на половину витка (рис. 15.2, *в*), L_2 определяется геометрическими

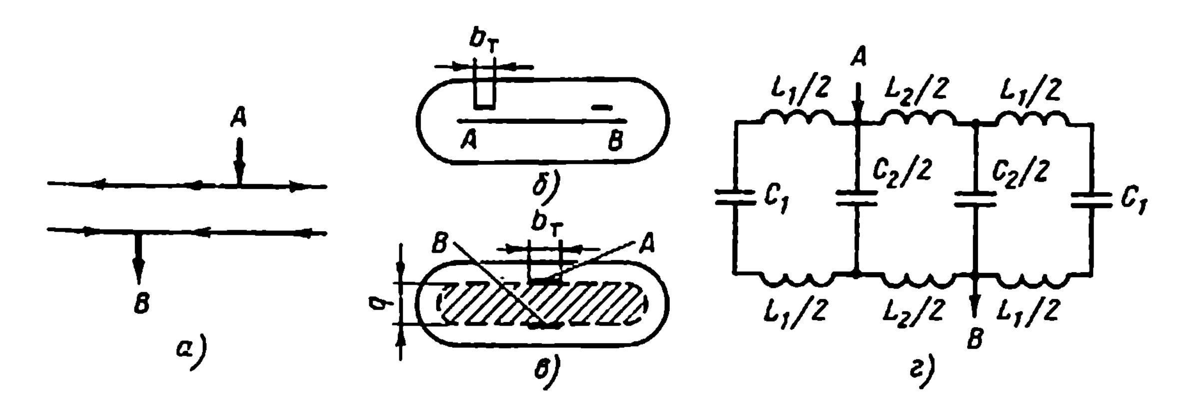


Рис. 15.2. Секция со смещением токоотводов по длине обкладок:
а – схема прохождения тока; *б* — смещение токоотводов в пределах ширины секции; *в* – смещение выводов на 0,5 оборота или кратное ему; *г* — эквивалентная схема

размерами петли, образуемой фольгой при ее намотке на половину оборота:

$$L_2=(\mu_0 l_{AB}/3b_\Phi)(2d_\Phi+3q)\approx\mu_0 l_{AB}q/b_\Phi, \quad (15.9)$$

где q — толщина всех предшествующих слоев (рис. 15.2, *в*).

При сдвиге на целый виток

$$L_2=\mu_0 S/b_\Phi, \quad (15.10)$$

где S — площадь поперечного сечения витка фольги.

При сдвиге токоотводов относительно друг друга на ΔW витков

$$L_2=(\mu_0/b_\Phi)[(\Delta W)^2 S_1+(\Delta W-1)^2\Delta S_1+$$
$$+(\Delta W-2)^2\Delta S_2+\ldots+\Delta S_{\Delta W-1}], \quad (15.11)$$

где S_1 — площадь поперечного сечения первого (наименьшего) витка; $\Delta S_1=S_2-S_1$; $\Delta S_2=S_3-S_2$ и т. д., т. е. разность площадей второго и первого, третьего и второго и т. д. витков.

Наименьшая индуктивность будет при расположении токоотводов строго друг над другом.

Индуктивность токоотводов секции при расположении их на одном торце и смещении в пределах ширины секции (рис. 15.2, *б*)

$$L_\text{Т}=\frac{\mu_0 l_\text{Т}}{\pi}\left(\ln\frac{l_{AB}}{b_\text{Т}}+\frac{3}{2}\right), \quad (15.12)$$

где $l_\text{Т}$ — длина и $b_\text{Т}$ — ширина токоотвода; l_{AB} — расстояние между осями токоотводов.

Если токоотводы сдвинуты относительно друг друга по длине обкладки на 1/2 витка или длину, кратную 1/2 витка, и расположены друг над другом (рис. 15.2, *в*), то

$$L_\text{Т}=\mu_0 l_\text{Т}(2d_\text{Т}+3q)/3b_\text{Т}, \quad (15.13)$$

где $d_\text{Т}$ — толщина токоотвода; q — расстояние между токоотводами.

15.3. ИНДУКТИВНОСТЬ СЕКЦИИ

Индуктивность секции L_c определяется индуктивностями L_1, L_2 и $L_\text{Т}$. Наиболее простое выражение для ее вычисления получается при расположении совмещенных токоотводов по середине длины обкладки, а токоотводов со сдвигом относительно друг друга — симметрично относительно середины обкладок. В этом случае индуктивности L_1 ветвей обкладок за пределами токоотводов (рис. 15.2, *г*) будут одинаковыми и образуют параллельное соединение с эквивалентной индуктивностью $L_1/2$, последовательно с которой включены ин-

дуктивности L_2 и $L_т$. При совмещенных токоотводах индуктивность $L_2=0$, и тогда

$$L_с=L_1/2+L_т=\mu_0 d_с l_ф/(12b_ф)+L_т. \qquad (15.14)$$

При наличии сдвига, пренебрегая емкостью секции на участке между смещенными токоотводами, имеем

$$L_с=L_1/2+L_2+L_т=\mu_0 d_с l_ф/(12b_ф)+L_2+L_т. \qquad (15.15)$$

Индуктивности L_1 и L_2 зависят не только от сдвига токоотводов относительно друг друга, но и от места их расположения по длине обкладок (рис. 15.3). Как видно из рис. 15.3, *а*, при совмещенных токоотводах место их расположения мало влияет на величину $L_с$. Наименьшее значение $L_{с\,min}$ будет при расположении совмещенных токоотводов по середине длины обкладки. По мере сдвига их к краям обкладок

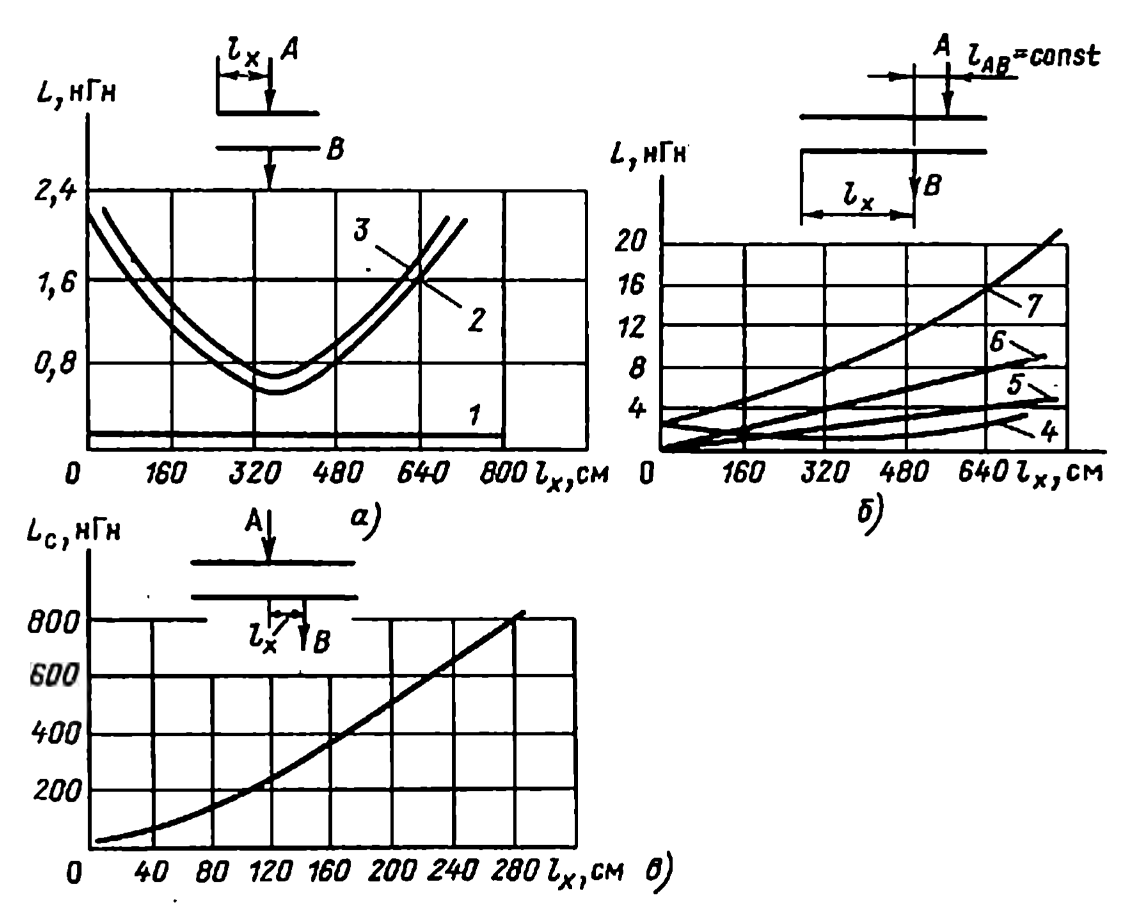


Рис. 15.3. Зависимость индуктивности секции от места расположения выводов по длине обкладок ($C=1{,}0$ мкФ; $d_с=8\times10$ мкм):

а — выводы *А* и *В* лежат непосредственно друг над другом; начало отсчета соответствует началу намотки секции; *б* — выводы сдвинуты относительно друг друга на 0,5 оборота по длине обкладок; *в* — выводы смещены по длине обкладок; вывод *А* заложен посредине обкладки секции; *1* — индуктивность выводов секции; *2* — индуктивность обкладок секции; *3* — суммарная индуктивность; *4* — индуктивность концов обкладок секции, расположенных бифилярно; *5* — индуктивность части обкладок между выводами; *6* — индуктивность выводов; *7* — суммарная индуктивность секции

L_c несколько возрастает. Для обычно применяемых секций силовых конденсаторов минимальная индуктивность секции составляет $L_{c\,min}=0{,}8\div1$ нГн, и максимальная $L_{c\,max}=(2\div4)\times\times L_{c\,min}$. При сдвиге между токоотводами на 1/2 витка индуктивность секции существенно возрастает по мере удаления их (с сохранением сдвига) от начала намотки по длине обкладки (рис. 15.3, *б*). Это объясняется увеличением индуктивностей L_2 и $L_т$ вследствие увеличения q или площади S за счет толщины предшествующих слоев. Индуктивность L_c при расположении токоотводов в конце намотки примерно в 6—7 раз больше индуктивности L_c при расположении токоотводов в начале намотки. При увеличении L_c сдвига между токоотводами значительно увеличивается L_c за счет увеличения индуктивности L_2 (рис. 15.3, *в*). Так, при увеличении сдвига между токоотводами с 1/2 до 11,5 витка индуктивность секции возрастает более чем в 300 раз. Если токоотводы располагаются по середине длины обкладок и смещаются относительно друг друга в пределах ширины секции, то при увеличении расстояния между ними индуктивность секции может возрастать до 20 раз по отношению к ее значению при совмещенных токоотводах и их расположении по середине длины обкладок. Минимальное расстояние между токоотводами определяется из условия перекрытия между ними, максимальное — шириной секции.

Уменьшение индуктивности секции может быть достигнуто за счет размещения нескольких пар токоотводов, равномерно расположенных по длине фольги [1.5]. Если число пар токоотводов равно $n_т$ и ток между выводами одной полярности распределяется равномерно, то индуктивность обкладок уменьшается обратно пропорционально $n_т^2$, а индуктивность системы токоотводов — обратно пропорционально $n_т$, при этом (15.14) приобретает вид

$$L_c=\mu_0 d_c l_ф/(12b_ф n_т^2)+L_т/n_т. \qquad (15.16)$$

Наиболее распространенным конструктивным выполнением секции в этом случае является смещение токоотводов секции

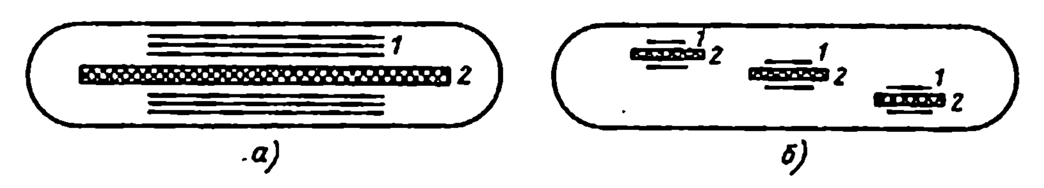
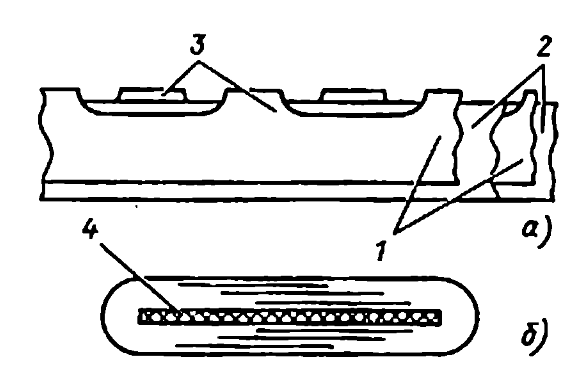


Рис. 15.4. Варианты размещения нескольких пар выводов в секции, равномерно расположенных по длине обкладки:

а — в каждой паре выводов один вывод смещен относительно другого на 0,5 оборота; *б* — в каждой паре выводов один вывод расположен непосредственно над другим; *1* — выводы одной полярности; *2* — изоляция между выводами

Рис. 15.5. Эскиз секции малоиндуктивного конденсатора со специальной формой обкладок:

а — эскиз секции; *б* — расположение выступов обкладок на торце секции; *1* — обкладка; *2* — диэлектрик; *3* — выступ на краю обкладки; *4* — изоляционная прокладка

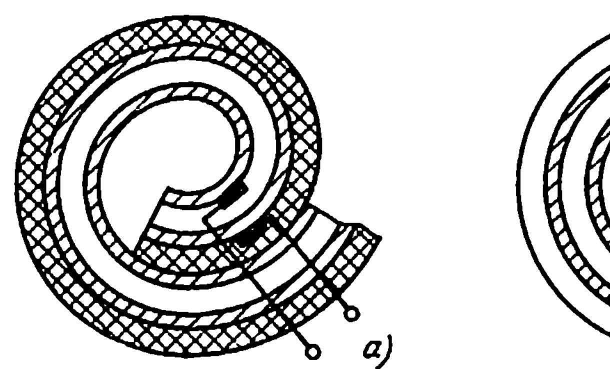


одной полярности на 1/2 оборота по длине обкладок относительно токоотводов другой полярности, так как при этом обеспечивается надежная изоляция между ними (рис. 15.4, *а*). Однако в этом случае достаточно затруднительно обеспечить равномерное распределение тока между токоотводами одной полярности, так как индуктивность различных пар токоотводов существенно отлична и возрастает по мере увеличения расстояния между токоотводами, при этом при большой ширине фольги обкладок ($b_ф > 200$ мм) практически весь ток вытесняется на первую пару токоотводов, расположенную в начале намотки и обладающую наименьшей индуктивностью.

Этот способ целесообразен главным образом для секций с малой шириной фольги ($b_ф < 100$ мм). В этом случае для увеличения количества выводов целесообразно применение фольги специальной конфигурации, имеющей выступы на боковых краях (рис. 15.5, *а*). При намотке выступы каждой из обкладок располагаются по разные стороны от изоляционной прокладки и соединяются вместе (рис. 15.5, *б*).

При увеличении числа пар токоотводов и обеспечении одинаковой индуктивности каждой пары токоотводов целесообразно равномерное распределение их по длине фольги и смещение по торцу секции в соответствии с рис. 15.4, *б*. В этом случае обеспечивается равномерное распределение тока между токоотводами одной полярности и становится справедливой формула (15.16).

В спирально намотанной секции каждый виток имеет емкость не только между своими обкладками, но и между соседними обкладками противоположной полярности смежных витков (рис. 15.6). Поэтому при совмещенных токоотводах эквивалентная схема рис. 15.1, *в* сохраняется только для половины емкости секции, образуемой двумя обкладками в развернутом виде (см. рис. 15.1, *а*). Для емкости, образуемой смежными витками, токоотводы смещены на один виток по длине обкладок, и для нее справедлива эквивалентная схема рис. 15.2, *г*. Для уменьшения индуктивности секции вводится третий токоотвод, совмещаемый с двумя другими и располагаемый так, чтобы токоотвод обкладки одной полярности



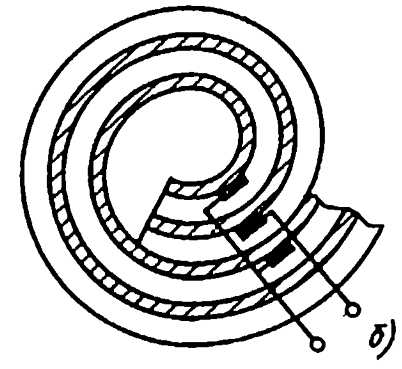


Рис. 15.6. Расположения выводов в секции друг над другом:
а — два вывода; *б* — три вывода; незаштрихованная часть — емкость, для которой выводы расположены друг над другом

находился между токоотводами двух соседних витков обкладки противоположной полярности, как это показано на рис. 15.6. При наличии нескольких пар токоотводов (см. рис. 13.1, *г*) они должны чередоваться так, чтобы они соответствовали рис. 15.1 поочередно как для емкости, образованной развернутыми обкладками, так и для емкости, образованной смежными витками обкладок.

Размещение токоотводов на разных торцах секции приводит к увеличению индуктивности секции, так как токи в обкладках направлены в одну сторону. Поэтому при использовании секции с выступающей фольгой (см. рис. 1.4) подвод тока в которую может быть осуществлен только с разных торцов секции, общая индуктивность конденсатора может возрасти по сравнению с секциями со скрытой фольгой и совмещенными токоотводами. При последовательном соединении таких секций индуктивность пакета дополнительно увеличивается за счет того, что ток идет по зигзагообразному пути. Индуктивность каждого зигзага определяется эквивалентно индуктивностью петли из двух шин сечением, равным поперечному сечению секции, с противоположными направлениями токов при весьма малом расстоянии между шинами и взаимной индуктивностью соседних петель. Индуктивность таких зигзагов для обычных конденсаторных секций может достигать значений до 50 нГн, тогда как в секциях со скрытой фольгой и токоотводами, расположенными на одном торце, можно получить индуктивность значительно меньше. Однако намотка секций с выступающей фольгой обеспечивает уменьшение потерь в обкладках и улучшение теплоотвода из внутренних частей секции.

В ряде случаев достаточно малая индуктивность может быть обеспечена в цилиндрическом односекционном конденсаторе с выступающей фольгой в секции с возвратом тока по металлическому корпусу конденсатора. В этом случае индуктивность такой системы без учета индуктивности вывода конденсатора

$$L_c = \frac{\mu_0 H_к}{2\pi} \ln\left(\frac{D_к}{D_c} + \frac{1}{4}\right). \quad (15.17)$$

где $H_к$ — высота конденсатора (цилиндрической секции); D_c — наружный диаметр секции; $D_к$ — внутренний диаметр металлического корпуса конденсатора.

15.4. ИНДУКТИВНОСТЬ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ШИН, ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ И ВЫВОДОВ

Способ соединения пакета секций, главных шин и выводов конденсатора и другие конструктивные особенности в большой мере сказываются на его индуктивности. Ниже рассмотрено несколько возможных вариантов конструкции конденсатора.

Первый случай наиболее характерен для большого количества последовательно соединенных секций или групп секций в пакете, когда крайние секции пакета соединяются плоскими шинами с выводами конденсатора (рис. 15.7). В этом случае индуктивность шин $L_ш$ будет пропорциональна площади сечения $S_ш$ пространства, заключенного между шинами и пакетом секций, и обратно пропорциональна ширине шины $b_ш$:

$$L_ш = \mu_0 S_ш / b_ш. \quad (15.18)$$

Второй случай характерен для большого количества параллельно соединенных секций, причем все секции присоединяются к шинам на одинаковом расстоянии (по шине) относительно выводов конденсатора.

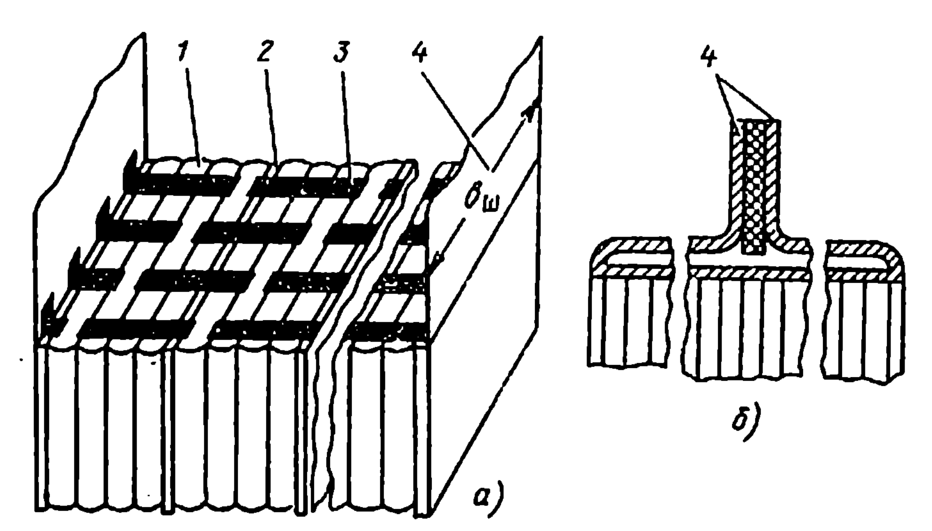


Рис. 15.7. Схема малоиндуктивного соединения секций в пакете (*а*) и токоведущих шин (*б*):

1 — секция; *2* — межгрупповая прокладка; *3* — соединение токоотводов; *4* — токоведущие шины

В этом случае индуктивность шин определяется по формуле, аналогичной (15.2в):

$$L_ш = \mu_0 d_ш l_ш / b_ш, \qquad (15.19)$$

где $l_ш$ — длина шин; $d_ш$ — расстояние между шинами, определяемое требуемой толщиной изоляции. В обоих вариантах ток по длине шины остается неизменным.

В третьем случае конденсатор состоит из n параллельно соединенных секций, причем секции присоединены равномерно вдоль длины шины, соединяющей их с выводами конденсатора (рис. 15.8, *а*). В этом случае ток, протекающий по шине, изменяется по ее длине и конденсатор может быть заменен эквивалентной схемой рис. 15.8, *б*. При равномерном расположении секции вдоль шины можно принять

$$\left.\begin{array}{l} L'_1 = L'_2 = \ldots = L'_n = L'_ш; \\ L_{c1} = L_{c2} = \ldots L_{cn} = L_c; \\ C_1 = C_2 = \ldots = C_n = C_c. \end{array}\right\} \qquad (15.20)$$

В этом случае по аналогии с индуктивностью фольги секции

$$L_ш = nL'_ш / 3. \qquad (15.21)$$

Так как

$$L'_ш = \mu_0 l'_ш d_ш / b_ш, \qquad (15.22)$$

где $l'_ш$ — длина участка между соседними секциями, то

$$L_ш = \mu_0 l_ш d_ш / 3b_ш. \qquad (15.23)$$

Суммарная индуктивность шин и пакета

$$L_ш + L_п = \mu_0 l_ш d_ш / 3b_ш + L_c / n. \qquad (15.24)$$

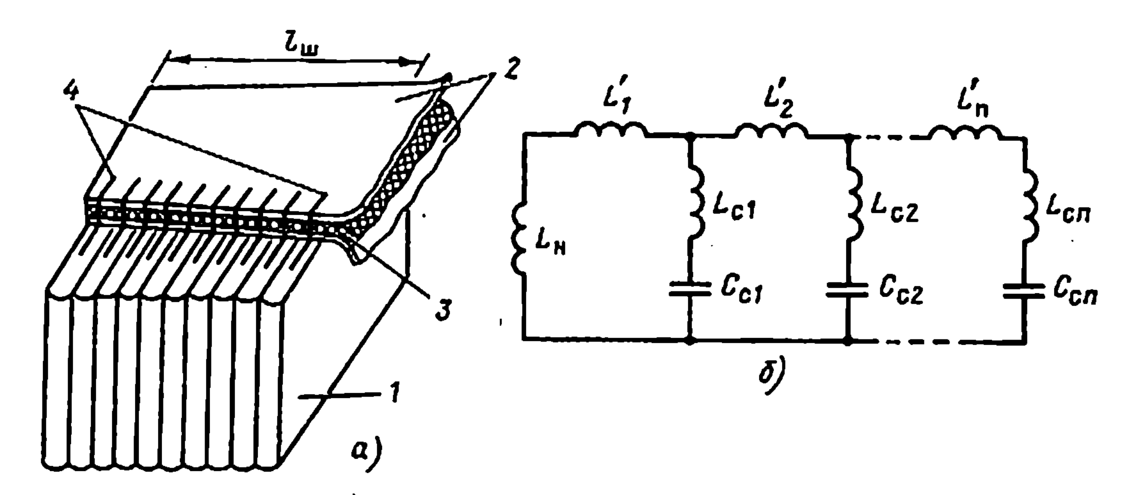


Рис. 15.8. Схема конденсатора (*а*) и эквивалентная схема (*б*) при параллельном соединении секций:
1 — секции; *2* — соединительные шины; *3* — изоляция между шинами; *4* — токоотводы секций

В ряде случаев при параллельном соединении секций каждая секция соединяется с общей шиной плавким предохранителем, сгорающим при пробое секции. Индуктивность предохранителя $L_{пр}$ зависит от его размеров и расположения относительно токоведущих частей конденсатора. Для случая, когда предохранитель расположен параллельно направлению тока в обкладках секций, индуктивность его можно определить как для системы провод — плоскость [15.1]:

$$L_{пр} = \frac{\mu_0 l_{пр}}{2\pi} \ln \frac{2h_{пр}}{r_{пр}}, \tag{15.25}$$

где $l_{пр}$ — длина предохранителя; $h_{пр}$ — расстояние между предохранителем и торцевой частью обкладки секции; $r_{пр}$ — радиус провода предохранителя.

Формула (15.25) справедлива при $r_{пр} \ll h_{пр}$.

Для уменьшения индуктивности конденсатора в ряде случаев вывод (или выводы каждой из полярностей) выполняется из нескольких стержней (болтов), соединенных параллельно, или в виде плоских шин, при этом выводы различных полярностей разделяются изолирующей перегородкой (см. рис. 1.12, *а*). Иногда выводы выполняются в виде двух коаксиальных цилиндров, также разделенных изолирующей перегородкой (см. рис. 1.12, *б*).

Рассмотрим случай, когда выводы конденсатора одной полярности выполняются в виде ряда стержней (болтов), а другой полярности — в виде шины. Если расстояние между соседними стержнями одинаковой полярности $a_п \gg h_в$ ($h_в$ — расстояние от стержня до шины противоположной полярности), то индуктивность выводов $L_в$ можно определить как для системы провод — плоскость, пренебрегая взаимоиндукцией между соседними стержнями одинаковой полярности:

$$L_п = \frac{\mu_0 l_в}{2\pi N_в} \ln \frac{2h_в}{r_в}, \tag{15.26}$$

где $l_в$ — длина токоведущей части стержня; $r_в$ — радиус стержня; $h_в$ — расстояние между осью стержня и плоскостью шины; $N_п$ — число стержней одной полярности.

В том случае, когда выводы обоих полярностей выполняются в виде стержней (болтов), причем расстояния между стержнями одной полярности много больше расстояния между стержнями противоположных полярностей, то индуктивность выводов можно определить как для системы провод — провод, пренебрегая взаимоиндукцией между стержнями соседних пар одинаковой полярности:

$$L_в = \frac{\mu_0 l_в}{\pi N_в} \ln \frac{h_в}{r_в}, \tag{15.27}$$

где $h_{в}$ — ближайшее расстояние между стержнями противоположных полярностей.

В случае, когда расстояние между стержнями одинаковой полярности $a_{в} \leqslant h_{в}$ или расстояния между ближайшими стержнями противоположной полярности, то необходимо учитывать взаимную индукцию между стержнями как одинаковой, так и противоположных полярностей.

В этом случае, если выводы одной полярности расположены в ряд, то их индуктивность на участке $b_{ш} = a_{в} N_{в}$ [15.2]

$$L_{в} = \mu_0 l_{в} \left(\frac{h_{в}}{b_{ш}} + \frac{a_{в}}{2\pi b_{ш}} \ln \frac{a_{в}}{2\pi r_{в}} \right) = \mu_0 l_{в} \left(\frac{h_{в}}{b_{ш}} + \frac{1}{2\pi N_{в}} \ln \frac{a_{в}}{2\pi r_{в}} \right). \quad (15.28)$$

Если стержни и выводы одной полярности расположены по окружности с радиусом R_1, а выводы противоположной полярности — по окружности с радиусом R_2 ($R_1 > R_2$, окружности концентрические) или вывод противоположной полярности выполнен в виде цилиндра с радиусом R_2, то

$$L_{в} = \frac{\mu_0 l_{в}}{2\pi} \left(\ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{2\pi N_{в}} \ln \frac{R_1}{N_{в} r_{в}} \right). \quad (15.29)$$

В (15.28) и (15.29) первый член соответствует индуктивности системы с непрерывным распределением тока либо по плоскости, эквивалентной плоскости расположения стержней одинаковой полярности (15.28), либо по окружности радиусом R_1 (15.29), второй член учитывает дискретный характер протекания тока.

15.5. ИНДУКТИВНОСТЬ КОНДЕНСАТОРА И МЕТОДЫ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

Индуктивность конденсатора зависит от схемы соединения его элементов. При соединении секций и шин по рис. 15.7, а также при параллельном присоединении секций к шинам на одинаковом расстоянии от вывода, когда ток в шине остается неизменным по ее длине, индуктивность коденсатора $L_{к}$ равна сумме индуктивностей пакета $L_{п}$ главных шин $L_{ш}$ и выводов $L_{в}$:

$$L_{к} = L_{п} + L_{ш} + L_{в} = L_{с} \frac{m}{n} + \frac{\mu_0 S_{ш}}{b_{ш}} + L_{в}, \quad (15.30)$$

где m — количество секций в конденсаторе, соединенных последовательно; n — то же, соединенных параллельно.

Если в конденсаторе n секций соединены параллельно в соответствии с рис. 15.8, когда ток шины изменяется по ее длине, эквивалентная индуктивность конденсатора в установившемся режиме (для импульсного конденсатора при раз-

ряде его на нагрузку с малой индуктивностью она относится к первой гармонике) определяется из выражения [при использовании (15.24)]

$$L_к = L_с/n + \mu_0 l_ш d_ш/(3b_ш) + L_в. \qquad (15.31)$$

В момент включения ($t=0$) эквивалентная индуктивность конденсатора $L'_к$ будет отличаться от значения $L_к$, вычисленного по (15.31). В первом приближении значение $L'_к < L_к$ на значение индуктивности шин $L_ш$ и определяется в основном индуктивностью выводов $L_в$.

Общее правило для снижения индуктивности конденсатора состоит в том, что токоведущие части в нем нужно стремиться располагать так, чтобы их магнитные поля взаимно компенсировались. Поэтому токоведущие части с противоположными направлениями токов надлежит максимально сближать, с одинаковыми — максимально удалять друг от друга. Форма и размеры токоведущих частей должны обеспечивать минимальную индуктивность. При совмещенных токоотводах при уменьшении толщины диэлектрика снижается индуктивность секции.

Снижение индуктивности секций может быть достигнуто делением одной секции большой емкости на несколько секций меньшей емкости, образующих группу секций. В каждой секции одна пара токоотводов смещается относительно другой так, как показано на рис. 15.7, *а*. Если имеется *n* параллельно соединенных групп, в каждой из которых секции соединены последовательно, то секции со смещенными токоотводами соединяются последовательно через $(n-1)$-ю секцию (см. рис. 15.7, *а*). Другие способы соединения секций приводят к повышению индуктивности.

В ряде случаев чрезвычайно важным является создание конденсаторов с предельно высокой собственной резонансной частотой:

$$f_р = 1/(2\pi\sqrt{L_к C_к}). \qquad (15.32)$$

Весьма важным является также и требование минимального волнового сопротивления конденсаторов $\rho_к = \sqrt{L_к/C_к}$, так как в этом случае можно получить максимальный ток при работе на малые нагрузки. Рассмотрим зависимость резонансной частоты и волнового сопротивления от габаритных размеров конденсатора.

Индуктивность рулонных секций конденсатора

$$L_с = \mu_0 l_ф d_с/(3b_ф) = \mu_0 S/(3b_ф), \qquad (15.33)$$

т. е. в этом случае индуктивность определяется площадью $S = l_ф d_с$, через которую проходит магнитный поток, определяющий индуктивность секции.

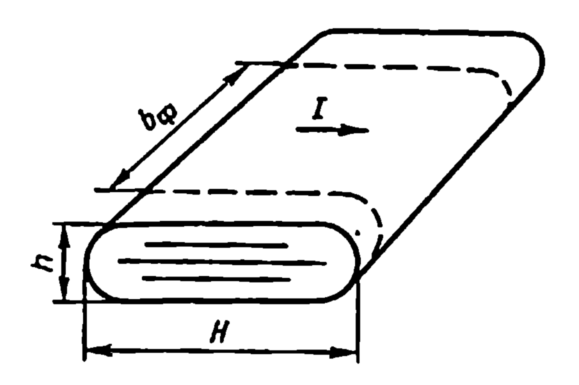


Рис. 15.9. Эскиз секции

Для секции, имеющей одну пару выводов, расположенную в начале обкладки, площадь может быть представлена в виде

$$S = l_ф d_c = n_{сл} H d = H h, \quad (15.34)$$

где $H \approx \pi D_{ср}/2$ — средняя длина слоя в секции; $n_{сл}$ — число слоев толщиной d_c в секции; $h = n_{сл} d_c$ — общая толщина секции (рис. 15.9).

Следовательно, если габариты секции равны соответственно $b \approx b_ф$, H и h, то индуктивность такой секции

$$L_c \approx \mu_0 H h/(3b). \quad (15.35)$$

Например, для секции импульсных конденсаторов на напряжение 3 кВ, емкостью 1,0 мкФ, имеющей габариты $h = 1$ см, $H = 10$ см, $b = 30$ см, с одной парой выводов, расположенной в начале обкладки,

$$L_c = \mu_0 H h/(3b) = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-1}/(3 \cdot 0{,}3) = 10^{-9} \text{ Гн}.$$

Таким образом, индуктивность определяется основными габаритными размерами пространства, занятого диэлектриками (H, h и b).

При увеличении числа пар выводов в секции и расположении их согласно рис. 15.4, *б* индуктивность рулонной секции падает обратно пропорционально квадрату этого числа. При рациональном способе соединения секций индуктивность конденсатора $L_к$, собранного из рулонных секций, увеличивается в первом приближении прямо пропорционально числу секций, соединенных последовательно, m и обратно пропорционально числу параллельно соединенных секций n:

$$L_к \approx L_c m/n. \quad (15.36)$$

Полная энергия секции конденсатора с размерами H, h и b

$$W_c = W_{уд} V_c = \frac{\varepsilon E_р^2}{2} H h b = \frac{C_c U_c^2}{2}, \quad (15.37)$$

где $V_c = Hhb$ — объем секции конденсатора.

С учетом (15.35) и (15.37) резонансная частота секции

$$f_{р.с} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{\mu_0 H h}{3b} \frac{\varepsilon_a E_р^2 H h b}{U_c^2}}} = \frac{U_c}{3{,}6 H h E_р \sqrt{\mu_0 \varepsilon_a}}. \quad (15.38)$$

Например, для секции с одной парой выводов в начале обкладок на напряжение 5 кВ, 1,0 мкФ, имеющей $E_р=80$ МВ/м,

$$f_{р.с}=\frac{U_с}{3{,}6HhE_р\sqrt{\mu_0\varepsilon_a}}=\frac{5\cdot10^3}{3{,}6\cdot10^{-3}\cdot80\cdot10^6\sqrt{4\pi\cdot10^{-7}\cdot5/4\pi\cdot9\cdot10^9}}=2{,}5\cdot10^6\ \text{Гц}.$$

Для конденсаторов, собранных из рулонных секций, индуктивность конденсатора может быть определена по (15.36). Учитывая, что емкость конденсатора в этом случае

$$C_к=C_с n/m, \tag{15.39}$$

можно заключить, что резонансная частота конденсатора $f_{р.к}$ равна резонансной частоте секции $f_{р.с}$ и не зависит от размеров конденсатора.

Основная трудность заключается в рациональной конструкции соединений секции и вывода конденсатора.

Используя равенства (15.35) и (15.37), определяем волновое сопротивление секции:

$$\rho_с=\sqrt{\frac{L_с}{C_с}}=\sqrt{\frac{\mu_0 Hh}{3b}\,\frac{U_с^2}{\varepsilon_a E_р^2 Hhb}}=0{,}58\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_a}}\,\frac{U_с}{E_р b}. \tag{15.40}$$

На основании (15.36) и (15.39) волновое сопротивление конденсатора

$$\rho_к=\rho_с\,\frac{m}{n}. \tag{15.41}$$

Таким образом, увеличение резонансной частоты возможно за счет сокращения размеров H и h, причем увеличение емкости в единице целесообразно производить за счет увеличения размера $b_ф$, не влияющего на резонансную частоту конденсатора, при этом также будет иметь место снижение волнового сопротивления конденсатора.

Глава шестнадцатая

ПЕРЕГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

16.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕГРУЗОК КОНДЕНСАТОРОВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Под перегрузками конденсатора понимаются те превышающие номинальную кратковременные или длительные нагрузки, которые он способен выдерживать без снижения ресурса

и надежности. Поэтому уже при его проектировании должны быть учтены требования в части перегрузок и предусмотрены необходимые запасы. Уровень перегрузок может быть различным для различных конденсаторов, и он оговаривается в соответствующей технической документации.

Перегрузки могут быть различными по своему характеру. В одном случае они приводят к изменению теплового режима конденсатора, как, например, при длительном повышении напряжения, появлении в нем гармоник или повышении частоты следования импульсов в импульсных конденсаторах, что имеет следствием повышение тепловых потерь. Это не приводит к появлению тепловой нестабильности, но увеличивает температуру в диэлектрике, что снижает ресурс конденсатора. В других случаях длительное рабочее напряжение остается в пределах допустимого, но конденсатор подвергается воздействию перенапряжений, уровень которых может превосходить порог возникновения критических ЧР, и тогда возникает ионизационное разрушение диэлектрика, при котором увеличиваются также и тепловые нагрузки конденсатора вследствие увеличения $\operatorname{tg}\delta$ за счет загрязнения диэлектрика продуктами ионизационного разложения. У конденсаторов с водяным охлаждением тепловые перегрузки могут возникать и вследствие недостаточного количества охлаждающей воды или ухудшения теплопередачи за счет отложения на стенках охлаждающей системы нетеплопроводящих осадков из растворенных в воде неорганических солей.

Параметры конденсатора при его проектировании выбираются такими, чтобы обеспечить тепловую устойчивость и требуемый ресурс для наиболее тяжелого случая тепловой нагрузки, т. е. при наибольшей допустимой емкости, напряжении, предельно допустимом значении $\operatorname{tg}\delta$ и максимально допустимой рабочей температуре. Конденсаторы не всегда работают в предельном тепловом режиме, при котором температура в диэлектрике равна предельно допустимой $\Theta_{доп}$. В этом случае конденсатор может быть дополнительно нагружен. Нагрузка может быть различной в зависимости от того, является она длительной или кратковременной. Определим допустимую мощность перегрузки при ее длительном воздействии, когда температура в диэлектрике достигает установившегося значения. Пусть конденсатор эксплуатируется в условиях, при которых установившаяся температура Θ_1 в нем была меньше допустимой, т. е. $\Theta_1 < \Theta_{доп}$. Обозначим превышение температуры в этом режиме $\Delta\Theta_1$, реактивную мощность Q_1 и тангенс угла потерь $\operatorname{tg}\delta_1$. Будем считать установившуюся температуру Θ_2 при перегрузке равной предельно допустимой: $\Theta_2 = \Theta_{доп}$. Остальные параметры обозначим соответственно через $\Delta\Theta_2 = \Delta\Theta_{доп}$, $Q_2 = Q'_{доп}$, $\operatorname{tg}\delta_{доп}$, причем $Q'_{доп}$ есть мощность,

при которой в данных условиях эксплуатации достигается предельно допустимая температура $\Theta_{доп}$ диэлектрика. Будем называть ее условно-допустимой. Она может отличаться от действительной предельно допустимой мощности, определяемой в строго регламентированных условиях. Очевидно, при $Q_2 = Q'_{доп}$ значение $\operatorname{tg}\delta_{доп}$ соответствует действительному предельно допустимому. На основании (14.92) для первого режима имеем

$$\Delta\Theta_1 = \Theta_1 - \Theta_0 = Q_1 \operatorname{tg}\delta_1 / L; \tag{16.1}$$

для второго

$$\Delta\Theta_{доп} = \Theta_{доп} - \Theta_0 = Q'_{доп} \operatorname{tg}\delta_{доп} / L. \tag{16.2}$$

Из (16.1) и (16.2) находим

$$Q'_{доп} = Q_1 \frac{\Delta\Theta_{доп}}{\Delta\Theta_1} \frac{\operatorname{tg}\delta_1}{\operatorname{tg}\delta_{доп}}. \tag{16.3}$$

Мощность $Q'_{доп}$ может быть приложена к конденсатору длительное время.

Определим время Δt перегрузки конденсатора мощностью $Q > Q'_{доп}$, при которой установившийся перегрев $\Delta\Theta_2 > \Delta\Theta_{доп}$. Зависимость превышения температуры в диэлектрике от времени для заданных потерь описывается формулой (14.124), легко преобразуемой к виду

$$\Delta\Theta = \Delta\Theta_у [1 - \exp(-t/\tau)], \tag{16.4}$$

где $\Delta\Theta_у$ — установившееся превышение температуры. На рис. 16.1 участок кривой от 0 до t_1 представляет изменение превышения температуры конденсатора во времени под воздействием нагрузки $Q_1 < Q'_{доп}$, и в этом режиме конденсатор имеет установившееся превышение температуры $\Delta\Theta_1$. Если в момент t_1 конденсатор подвергается перегрузке мощностью $Q > Q'_{доп}$, то изменение $\Delta\Theta$ происходит по кривой, соответствующей $\Theta > \Theta_1$. В этом режиме $\Delta\Theta_2 > \Delta\Theta_1$. На этом участке кривой

$$\Delta\Theta - \Delta\Theta_1 = (\Delta\Theta_2 - \Delta\Theta_1) \times \\ \times [1 - \exp - (t - t_1)/\tau]. \tag{16.5}$$

Допустимое время воздействия перегрузки определяется временем Δt, в течение которого превышение температуры диэлектрика достигает $\Delta\Theta_{доп}$:

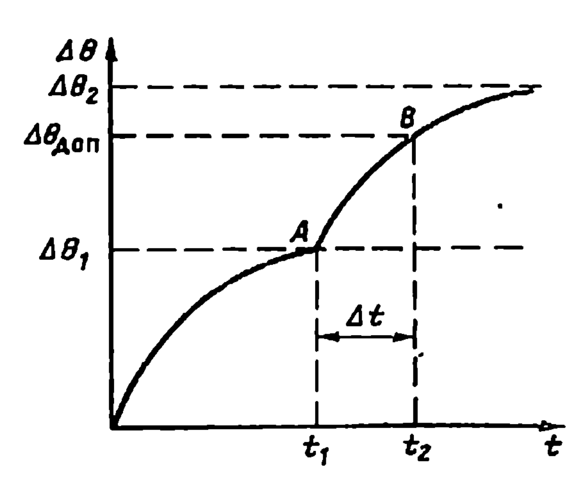


Рис. 16.1. Зависимость температуры диэлектрика от времени при перегрузках конденсатора

$$\Delta\Theta_{доп}-\Delta\Theta_1=(\Delta\Theta_2-\Delta\Theta_1)\{1-\exp[-(t_2-t_1)/\tau]\}= \\ =(\Delta\Theta_2-\Delta\Theta_1)[1-\exp(-\Delta t/\tau)]. \quad (16.6)$$

Из (16.6) имеем

$$\Delta t=\tau\ln\frac{\Delta\Theta_2-\Delta\Theta_1}{\Delta\Theta_2-\Delta\Theta_{доп}}. \quad (16.7)$$

Выражая через соответствующие реактивные мощности и полагая в первом приближении, что значения $\operatorname{tg}\delta$, соответствующие мощностям Q_1, $Q'_{доп}$ и Q, различаются незначительно, формулу (16.7) можно привести к виду

$$\Delta t=\tau_0\ln[(Q-Q_1)/(Q-Q'_{доп})]. \quad (16.8)$$

Более строгая формула имеет вид

$$\Delta t=\tau_0\ln[(Q\operatorname{tg}\delta-Q_1\operatorname{tg}\delta_1)/(Q\operatorname{tg}\delta-Q'_{доп}\operatorname{tg}\delta_{доп})]. \quad (16.9)$$

Заменяя далее

$$Q_1=Q'_{доп}-\Delta Q_н, \quad (16.10)$$

где $\Delta Q_н$ — мощность недогрузки по отношению к условно-допустимой, и, подставляя (16.10) в (16.8), имеем

$$\Delta t=\tau_0\ln\frac{Q-Q'_{доп}+\Delta Q_н}{Q-Q'_{доп}}=\tau_0\ln\left(1+\frac{\Delta Q_н}{\Delta Q_п}\right), \quad (16.11)$$

где $\Delta Q_п=Q-Q'_{доп}$ — мощность перегрузки по отношению к условно-допустимой.

Изложенное относится к случаю работы конденсатора при синусоидальном напряжении. При наличии гармоник вначале производится расчет мощности потерь в конденсаторе по § 13.4, а затем оцениваются возможность и длительность его перегрузки. Для этого используется формула (16.9), в которой значения $Q\operatorname{tg}\delta$ соответственно заменяются мощностью потерь. При определении перегрузок следует учитывать также и то обстоятельство, чтобы ток не был чрезмерным.

16.2. ДОПУСТИМЫЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА КОНДЕНСАТОРЕ

В общем случае надежная работа конденсатора может быть обеспечена только в том случае, когда напряженность поля и температура в диэлектрике не будут превосходить значений, обеспечивающих требуемый ресурс. Однако без ущерба для ресурса могут быть допущены кратковременные перенапряжения. Для конденсаторов, работающих при напряжении промышленной частоты, не содержащем высокочастотных

составляющих, кратность и время действий перенапряжений, не снижающих их ресурса, приведены ниже [16.1].

Время действия	Периоды				Секунды	Минуты		
Длительность	1/2	1	15	60	15	1	5	30
Кратность перенапряжений	3,0	2,7	2,0	1,75	1,4	1,3	1,2	1,15

Конденсатор должен выдерживать в течение всего срока службы 300 указанных выше перенапряжений.

Для коммутационных перенапряжений допустимая кратность в зависимости от числа коммутаций в году приведена ниже [16.1].

Предполагаемое число коммутаций в году	4	40	400	4000
Кратность перенапряжения	5	4	3,4	2,9
Кратность амплитуды тока переходного режима по отношению к номинальному	1500	1150	800	400

Глава семнадцатая

ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

17.1. ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ

Конденсаторы эксплуатируются в самых различных режимах и условиях и должны быть спроектированы и изготовлены так, чтобы при заданных условиях и заданном уровне надежности отработали заданное время. Соответствие конденсатора заданным условиям и качество его изготовления проверяются испытаниями. В процессе разработок конденсатора проводятся исследовательские испытания материалов и конструкции, назначением которых является изучение их свойств и характеристик и влияния на них отдельных параметров или технологических факторов. На основании этих исследований производится оценка их возможностей и устанавливаются оптимальные параметры и конструкция предназначенного для серийного выпуска конденсатора. Серийно выпускаемая продукция подвергается ряду контрольно-проверочных испытаний, виды и назначение которых устанавливаются ГОСТ 16504-81 «Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения». Части этих испытаний подвергается вся выпускаемая продукция без исключения (поштучные испытания), часть их проводится на определенном количестве конденсаторов — выборке (выборочные испытания). Перечень подлежащих контролю

характеристик, характер контроля (поштучный или выборочный), объем выборки и правила ее комплектования, а также сроки проведения испытаний устанавливаются в нормативно-технической документации (НТД). Эти испытания включают в себя: а) *квалификационные испытания*, проводимые на установочной серии или первой промышленной партии при постановке конденсаторов на производство и служащие для проверки готовности предприятия к выпуску данной продукции; б) *приемо-сдаточные испытания* проводятся при приемочном контроле готовой продукции и являются поштучными; в) *периодические испытания* служат для проверки качества и стабильности конденсаторов и являются выборочными; г) *типовые испытания* проводятся в целях оценки эффективности и целесообразности изменений, вносимых в конструкцию конденсатора; д) *государственные испытания* проводятся головной организацией по проведению этих испытаний, утвержденной в установленном порядке, и служат для решения вопроса о целесообразности дальнейшего выпуска данного типа конденсатора.

Параметры, характеризующие конденсатор, довольно многочисленны и различны по своей физической природе. В соответствии с этим испытания делятся на электрические, климатические, механические и испытания на теплостойкость. Электрические испытания включают в себя кратковременные (продолжительностью не более 1 мин) испытания изоляции между обкладками и от корпуса переменным напряжением (50 Гц) или постоянным напряжением, испытания изоляции от корпуса грозовыми и коммутационными импульсами, испытания внешней изоляции под дождем, испытания изоляции между обкладками переменным (частотой 50 Гц) или постоянным напряжением различной продолжительности (при плавном подъеме и снижении, с выдержкой до 20 мин и т. д.), испытания разрядами накоротко или на специальные контуры, зарядно-разрядные циклы и т. д., измерение емкости и $\operatorname{tg}\delta$, в том числе при различных температурах, измерения характеристик ЧР. Ресурсные испытания и испытания на надежность хотя и относятся к электрическим испытаниям, но ввиду их специфичности, как правило, рассматриваются отдельно (см. гл. 10). Испытания на теплостойкость проводятся для оценки тепловой устойчивости конденсатора при длительных перегрузках, обусловленных повышением напряжения и (или) появлением гармоник тока или напряжения. Для ряда типов конденсаторов (конденсаторы для повышения коэффициента мощности в сетях частотой 50 Гц) они практически утратили свою значимость в связи с резким снижением $\operatorname{tg}\delta$, но для ряда других типов (электротермические) они являются важными. Климатические испытания включают в себя: а) ис-

пытания на воздействие смены температур; б) испытания на холодостойкость при эксплуатации и температуре транспортирования и хранения; в) испытания на воздействие инея с последующим оттаиванием; г) испытания на воздействие пониженного атмосферного давления.

Механические испытания проводятся для проверки механической прочности конструкции при воздействии на нее вибрации, тряски и ударов. Приведенный довольно широкий перечень испытаний относится ко всем типам конденсаторов. Конкретные испытания, свойственные какому-то одному типу конденсатора, устанавливаются в НТД.

17.2. ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ ТИПОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Условия и режимы проведения испытаний задаются в НТД. Для конденсаторов, работающих в ЛЭП, распределительных сетях и связанных с ними устройствах, а также электротермических условия испытаний определяются для конденсаторов для повышения коэффициента мощности при частотах 50 и 60 Гц — публикацией 70 МЭК, ГОСТ 1282-88, ГОСТ 27390-87 [12.2, 17.1]; для конденсаторов связи, отбора мощности, измерения напряжения (в фарфоровых корпусах) — публикацией 358 МЭК и ГОСТ 15581-80 [12.4, 17.2]; для электротермических конденсаторов — публикацией 110 МЭК и ГОСТ 18689-81 [12.3, 17.3]. В соответствии с этими НТД электрические испытания должны производиться при температуре окружающего воздуха $(25 \pm 10)^\circ$ C, атмосферном давлении 86—105 кПа (640—800 мм рт. ст.) и относительной влажности воздуха до 80%. Для конденсаторов для повышения коэффициента мощности при частотах 50 и 60 Гц и электротермических конденсаторов при испытаниях изоляции между обкладками испытательные напряжения составляют $2{,}15U_{ном}$ при частоте 50 Гц и $4{,}3U_{ном}$ при постоянном напряжении, которые конденсаторы должны выдерживать в течение 10 с. Перед испытаниями и после испытаний производится измерение емкости. Испытания грозовыми и коммутационными импульсами производятся согласно ГОСТ 1516.2-76 [17.4]. Для конденсаторов для повышения коэффициента мощности значения импульсных испытательных напряжений приведены в § 12.6.

Испытания производятся полными грозовыми импульсами 1,2/50 мкс путем приложения напряжения между выводами, соединенными вместе, и корпусом по пять импульсов каждой полярности. Интервал времени между приложениями напряжения должен быть не менее 2 мин. Конденсаторы считаются выдержавшими испытание, если не произошло пробоев или

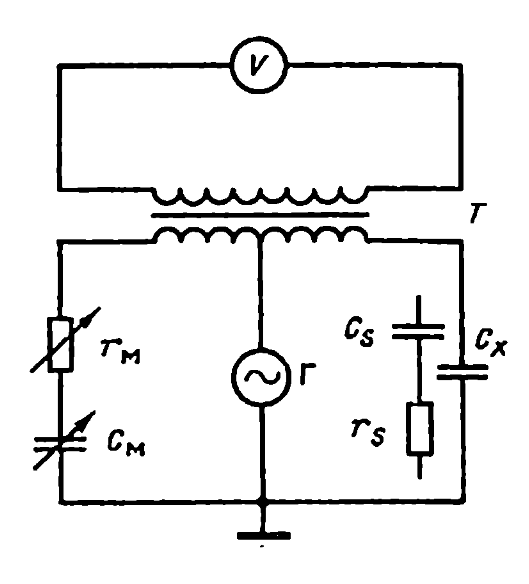


Рис. 17.1. Мостовой метод измерения эквивалентных емкости и сопротивления конденсатора связи:

C_x — испытуемый конденсатор; C_s и r_s — его эквивалентные емкость и сопротивление; $C_м$ и $r_м$ — регулируемые емкость и сопротивление

перекрытия изоляции. В случае одного перекрытия из пяти импульсов одной полярности испытание должно быть продолжено с приложением 10 дополнительных импульсов той же полярности. Конденсаторы считаются выдержавшими испытание, если при этом не произошло перекрытия.

Конденсаторы должны выдерживать также пять разрядов накоротко после заряда напряжением постоянного тока $2U_{ном}$ для конденсаторов с номинальным напряжением до 1,05 кВ и $2{,}5U_{ном}$ для конденсаторов с номинальным напряжением 1,05 кВ и выше. Испытание разрядами проводится в течение 10 мин. Не менее чем через 5 мин после этого испытания проводится повторное испытание испытательным напряжением при частоте 50 Гц между выводами конденсатора. До испытания на разряд и после испытаний напряжением между выводами измеряется емкость конденсатора. Изменение значений емкости не должно превышать 2%.

Измерения емкости и $\mathrm{tg}\,\delta$ производятся при напряжении $(0{,}9-1{,}1)\,U_{ном}$ и частоте 50 Гц. Допускается измерение $\mathrm{tg}\,\delta$ при пониженном напряжении, но не ниже $0{,}5U_{ном}$. При снятии температурной зависимости емкости или $\mathrm{tg}\,\delta$ испытуемый конденсатор помещается в термошкаф, для выдерживания при данной температуре в течение некоторого времени, определяемого типом конденсатора. Допускаемая погрешность при измерении емкости не должна превышать $\pm 1\%$, а при измерении $\mathrm{tg}\,\delta$ $(\pm 1\cdot 10^{-2}\,\mathrm{tg}\,\delta_{изм}+3\cdot 10^{-4})$, где $\mathrm{tg}\,\delta_{изм}$ — измеряемое значение.

Для определения эквивалентных емкости и последовательного сопротивления по высокой частоте конденсатора связи рекомендуется мостовой метод (рис. 17.1). После уравновешивания моста имеем $r_s=r_м$ и $C_s=C_м$. Если метод моста не может быть использован, то r_s и C_s рассчитываются по формулам

$$C_s=C_p\left(1+1/\omega^2C_p^2R_p^2\right); \qquad (17.1)$$

$$r_s=R_p/\left(1+\omega^2C_p^2R_p^2\right), \qquad (17.2)$$

где C_p, R_p — емкость и сопротивление по параллельной схеме;

Испытания на теплостойкость должны производиться на конденсаторах, имеющих наибольшие значения емкости (мощности) и $\mathrm{tg}\,\delta$ по сравнению с другими. Продолжительность испытания составляет обычно 48 ч. Испытуемые конденсаторы нагружаются испытательной мощностью $Q_{исп}=1{,}44Q_{ном}$ (при частоте 50 Гц), а электротермические $1{,}2Q_{ном}$. Конденсаторы считаются выдержавшими испытания, если в течение последних 10 ч испытаний отклонения $\mathrm{tg}\,\delta$ или температуры корпуса от установившихся значений не превосходят значений, установленных в НТД. Испытательное напряжение для конденсаторов при частоте 50 Гц определяется по формуле

$$U_{исп}=1{,}2U_{ном}\sqrt{C_{ном}/C_{исп}}, \qquad (17.3)$$

где $U_{ном}$ и $C_{ном}$ — соответственно номинальные напряжения и емкость; $C_{исп}$ — емкость испытуемого конденсатора.

Для определения потерь в конденсаторах с водяным охлаждением в [12.3] рекомендуется формула

$$P=70q\Delta\Theta, \qquad (17.4)$$

где q — расход воды, л/мин; $\Delta\Theta$ — перепад температуры воды в охлаждающей системе.

Ресурсные испытания и испытания на надежность являются испытаниями ускоренными, проводимыми при повышенных по отношению к рабочим напряженности и температуре, но при этом не должно нарушаться физическое подобие процессов старения. Обычно $E_{исп}=(1{,}3\div1{,}6)E_р$. Результаты этих испытаний подвергаются статистической обработке.

Климатические испытания проводятся для проверки внешней изоляции и качества защитных покрытий. Механические испытания проводятся на ударном и вибростендах и служат для проверки механической прочности конструкции при воздействии ударов, тряски и вибрации.

Испытания импульсных конденсаторов помимо общих электрических испытаний, свойственных всем типам конденсаторов и проводимых по тем же методикам, содержат ряд особенностей. Условия их проведения и испытательные параметры устанавливаются в НТД на конкретные типы конденсаторов. Испытание выпрямленным напряжением производится при $U_{исп}=(1{,}2\div1{,}5)U_{ном}$. Нижнее значение ($1{,}2U_{ном}$) соответствует конденсаторам, предназначенным для работы в режиме апериодического разряда. Длительность испытаний составляет 1—3 мин. Эквивалентная индуктивность конденсатора может быть определена либо путем определений первой (низшей) из ряда резонансных частот частоты, по которой она рассчитывается по известной формуле для определения резонансной частоты в LC-цепи, либо косвенным путем — по кривой затухания

колебательного разряда конденсатора. Эквивалентное активное сопротивление определяется одновременно с определением нижней резонансной частоты. Добротность конденсатора Q может быть определена по декременту Δ_0 колебаний, возбужденных в замкнутом на малую индуктивность (без искровых промежутков) контуре в предположении, что дополнительными потерями во внешней цепи контура можно пренебречь. Для этой цели используются два индуктивно связанных контура. Контур, состоящий из исследуемого конденсатора и малоиндуктивной петли, слабо связан с возбуждающим контуром, состоящим из катушки и конденсатора и имеющим значительную меньшую частоту колебаний. Определение Δ_0 в исследуемом втором контуре возможно при условии, что затухание колебаний в нем не зависит от параметров первого контура. Эти требования выполняются, если: 1) частота собственных колебаний второго контура значительно выше, чем первого, и 2) коэффициент связи контура M мал. Для удовлетворения этих требований в первый контур включается индуктивность L_1, значительно превышающая L_2. Малое значение M достигается малой площадью петли второго контура и выбором расстояния между петлей и L_1. Для определения Δ_0 производится осциллографирование падения напряжения на внешней индуктивности второго контура осциллографом с памятью.

Определение динамической устойчивости и дополнительной проверки электрической прочности производится при испытаниях 20 разрядами на контур, обеспечивающий протекание номинального тока при номинальном напряжении. Для конденсаторов, предназначенных для работы в режиме колебательного разряда, зарядное напряжение может быть повышено до $1{,}1U_{ном}$. Отсутствие повреждений проверяется по емкости, измеренной до и после испытаний, которая должна оставаться неизменной, а также по отсутствию слышимых разрядов внутри конденсатора. Если измерение тока утечки конденсатора на высоком напряжении затруднено, производится измерение сопротивления изоляции, которое должно быть не ниже 2000 Ом·Ф. Оно может быть определено также и по саморазряду с использованием известной формулы

$$u_C = \exp(-t/\tau), \qquad (17.5)$$

где $\tau = R_{из}C$ — постоянная времени саморазряда.

17.3. ИСПЫТАНИЯ НА ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

Основными характеристиками ЧР являются [9.3]: а) кажущийся заряд $q_{чр}$; б) частота следования разрядов $n_{чр}$ (среднее число ЧР в 1 с); в) средний ток ЧР

$$I_{чр}=\sum_{i=0}^{n}(|q_{i+1}|+|q_i|)(n_{i+1}-n_i)/2\approx q_{чр.ср}n_{чр.ср}, \qquad (17.6)$$

где q_i — i-й уровень ЧР; n_i — количество ЧР в 1 с, кажущийся заряд которых превышает i-й уровень (значению $i=0$ соответствует $n_i=0$); г) энергия ЧР $W_{чр}\approx q_{чр}U_m$; д) средняя мощность ЧР

$$P_{чр}=W_{чр.ср}n_{чр.ср}\approx I_{чр}U_m, \qquad (17.7)$$

где U_m — амплитуда напряжения, приложенного к конденсатору; е) напряжение возникновения ЧР заданной интенсивности; ж) напряжение погасания ЧР заданной интенсивности.

При испытаниях конденсаторов непосредственно измеряются напряжения возникновения и погасания ЧР, заряд $q_{чр}$ и частота следования $n_{чр}$ с кажущимся зарядом, лежащим в заданном интервале значения, средние ток и мощность могут определяться либо непосредственными измерениями, либо расчетным путем. По полученным данным может быть построен спектр ЧР — зависимость $n_{чр}$ от среднего значения $q_{чр}$ заданного диапазона или зависимость $n_{чрi}$ при $q_{чр}\geqslant q_{чрi}$.

Измерения характеристик ЧР производятся для достижения одной или нескольких целей: а) установить, что в испытуемом конденсаторе отсутствуют ЧР, измеряемые характеристики которых превосходят нормированные значения при нормированном напряжении; б) определить напряжение возникновения и погасания ЧР заданной интенсивности; в) установить, что интенсивность ЧР в испытуемом конденсаторе не изменяется во времени свыше допустимых значений за время действия нормированного испытательного напряжения. Для измерения характеристики ЧР используются схемы рис. 17.2. В состав каждой из них входят источник регулируемого высокого напряжения (испытательный трансформатор ИТ), испытуемый конденсатор C_x, соединительный конденсатор C_0, служащий для замыкания пути протекания импульсов тока ЧР, измерительный элемент z, измерительное устройство, подключаемое параллельно измерительному элементу и состоящее из фильтра верхних частот *Ф*, широкополосного или резонансного (узкополосного) усилителя *У*, индикаторного устройства (электронного осциллографа) *ЭО* и счетчика импульсов *С*. Между источником высокого напряжения и остальной частью схемы в большинстве случаев включается защитное сопротивление $R_з$ или фильтра для подавления внешних помех. На рис. 17.2, *а* приведена схема с включением измерительного элемента в ветвь заземления испытуемого конденсатора, на рис. 17.2, *б* — с включением измерительного элемента в ветвь заземления соединительного конденсатора, а на рис. 17.2, *в* — мостовая схема. Источник регулируемого

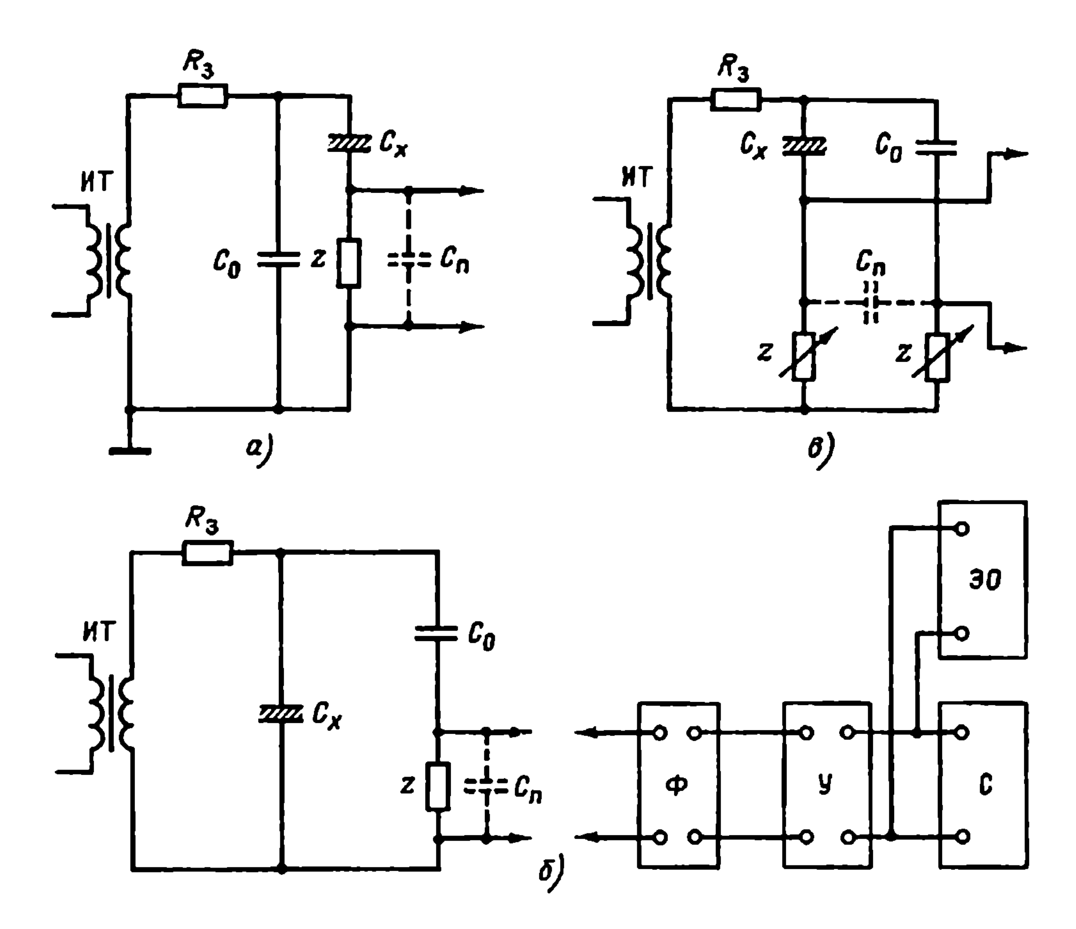


Рис. 17.2. Схемы установки для измерения характеристик ЧР

высокого напряжения и соединительный конденсатор не должны иметь ЧР, мешающих измерениям характеристик ЧР в испытуемом конденсаторе. Измерительный элемент z может представлять собой активное сопротивление или катушку индуктивности. Мостовая схема рис. 17.2, *в* рекомендуется при использовании измерительного элемента, состоящего из двух регулируемых малоиндуктивных активных сопротивлений z. Активное сопротивление рекомендуется использовать при применении широкополосного измерительного устройства, катушку индуктивности — узкополосного измерительного устройства.

Для получения спектральных характеристик ЧР может быть использован амплитудный анализатор импульсов, имеющий ряд каналов, каждый из которых регистрирует количество импульсов с кажущимся зарядом в заданном интервале значений с выводом полученных значений на ЭВМ, а также всего спектра амплитуд или его участков на дисплей. В большинстве случаев [9.1, 9.3] для измерения ЧР в конденсаторах используется регистратор, настроенный на частоту от 10 кГц до собственной резонансной частоты конденсатора. Чувствительность схемы должна быть не хуже 50 пКл.

При испытаниях конденсаторов с большей емкостью для повышения чувствительности измерительной схемы на входе измерительного устройства применяется высокочастотный входной трансформатор, а также соединительный конденсатор с емкостью $C_0 \approx C_x$. Коэффициент трансформации входного трансформатора можно ориентировочно оценить по формуле $k = 0{,}06\sqrt{C_э}$, где $C_э = C_x C_0/(C_x + C_0)$ ($C_э$ — в пикофарадах).

Для измерения характеристик ЧР в ряде случаев используются приборы, основанные на регистрации ультразвуковых сигналов на частоте 80 кГц с помощью ультразвукового датчика, прикрепленного к корпусу конденсатора, с последующим усилением сигнала. Минимальный регистрируемый заряд обеспечивается на уровне 20 пКл [9.14]. Градуировка установок для измерения характеристик ЧР может производиться по одной из схем рис. 17.3. По схеме рис. 17.3, *а* генератор прямоугольных импульсов *Г*, имитирующих ЧР, включается в схему параллельно испытуемому конденсатору C_x через небольшую емкость $C_г$, причем $C_г \ll C_x$ и $C_г \ll C_0$, при этом кажущийся заряд от градуировочного импульса

$$q_г = \Delta U_г C_г. \qquad (17.8)$$

По отклонению луча на экране осциллографа при заданном $q_г$ можно определить чувствительность схемы по кажущемуся заряду. В схеме рис. 17.3, *б* генератор *Г* включается последовательно с испытуемым конденсатором C_x, и в этом случае

$$q_г = \Delta U_г C_x. \qquad (17.9)$$

Испытания на ЧР производятся обычно при температуре 20—25° С. В соответствии с рекомендациями МЭК [17.5], а также [17.6] в процессе испытаний сначала прикладывается номинальное напряжение $U_{ном}$ до достижения теплового равновесия, затем на 1 с прикладывается переменное напряжение $U_\sim$, выбранное по условиям возникающих в процессе

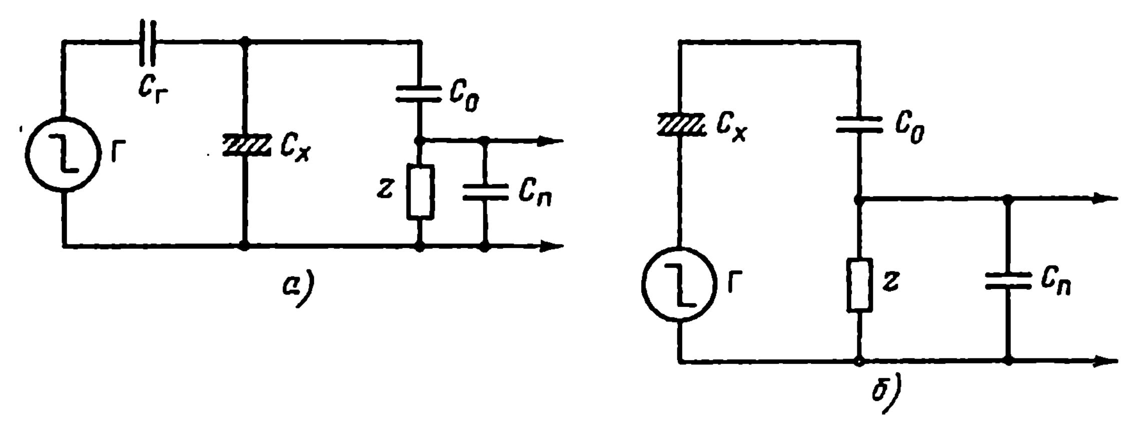


Рис. 17.3. Схемы градуировки установки измерения характеристик ЧР:
а — параллельная; *б* — последовательная

эксплуатации перенапряжений, после чего оно снижается до $1,2U_{ном}$ и выдерживается в течение 10 мин; затем оно снова повышается до $1,5U_{ном}$ и выдерживается еще 10 мин. В процессе этого испытания не должно возникать ЧР заданной интенсивности (50 пКл) и не должен изменяться уровень ЧР. В ряде случаев кроме этого испытания конденсатор заряжается постоянным напряжением до значения, равного амплитуде ожидаемых перенапряжений, и разряжается на заданный контур. Производятся 50 разрядов с интервалом в 5 с, после чего прикладывается напряжение $1,2U_{ном}$ в течение 10 мин, а затем напряжение $1,5U_{ном}$ также на 10 мин, при этом не должно наблюдаться изменение уровня ЧР. В ряде случаев оба эти испытания объединены в одно, в котором вместо приложения двух напряжений в $1,2U_{ном}$ и $1,5U_{ном}$ по 10 мин каждое предлагается прикладывать одно напряжение $1,6U_{ном}$ в течение 10 мин. Может предусматриваться испытание напряжением $2U_{ном}$ в течение 1 с, после которого прикладываются напряжения в $1,2U_{ном}$ и $1,5U_{ном}$ в течение 10 мин каждое, при этом не должно возникать устойчивых ЧР с амплитудой $5\cdot10^{-9}C^{0,5}$ Кл, где C — емкость конденсатора в микрофарадах. Применяются также испытания, в процессе которых к конденсатору прикладываются напряжения последовательно $3U_{ном}$ в течение 1 с, $1,2U_{ном}$ — 10 мин, $1,5U_{ном}$ — 10 мин. При последнем напряжении не должно возникать ЧР на уровне 60 пКл.

Глава восемнадцатая

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ

18.1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНДЕНСАТОРА

К технологическому процессу изготовления конденсатора на каждой его стадии (намотка секций, сборка пакетов и конденсаторов, термовакуумная обработка) предъявляются очень высокие требования в отношении чистоты, включающие нормирование размеров и количества в 1 см^3 твердых частичек в атмосфере помещения, где производится намотка секций. Основным, наиболее сложным и важным в технологическом процессе является процесс термовакуумной обработки, включающий в себя вакуумную сушку и обезгаживание диэлектрика, очистку, вакуумную сушку и обезгаживание пропитывающей жидкости и последующую пропитку ею диэлектрика под вакуумом. На этой стадии составляющие диэлектрик материалы (являющиеся основным рабочим элементом конденсатора)

подготавливаются к тому, чтобы в течение заданного времени выдерживать те высокие электрические и тепловые нагрузки, при которых они работают в процессе эксплуатации конденсатора. Для оптимизации термовакуумного процесса необходимо изучение механизмов поглощения и отдачи влаги материалами, называемых процессами сорбции и десорбции [18.1—18.10].

Применяемые в силовом конденсаторостроении твердые изоляционные материалы различаются по своим сорбционным свойствам. Синтетические полимерные пленки являются материалами с плотной структурой, поры в которой отсутствуют и влага сорбируется только их поверхностью. В конденсаторных бумагах, имеющих пористую структуру, сорбированная поверхностью волокон влага диффундирует в поры, и процессы сорбции и десорбции в них являются более сложными. Количество влаги, сорбируемое бумагами, значительно больше количества влаги, сорбируемого пленками, и поэтому процесс сушки бумажного и бумажно-пленочного диэлектриков значительно превосходит по длительности процесс сушки пленочного. Структура и размеры молекулы воды показаны на рис. 18.1. Поляризуемость воды $\alpha = 1{,}647 \cdot 10^{-40}$ Ф·м^2 и дипольный момент $M = 6{,}133 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Для сорбционных явлений определяющим является эффективный диаметр молекулы воды, который в зависимости от условий колеблется в пределах $(2{,}9—4{,}5) \cdot 10^{-10}$ м, т. е. молекулы воды могут проникать даже во внутримицеллярные поры. В областях с кристаллической структурой расстояния между макромолекулами целлюлозы малы, проникновение в них молекул H_2O невозможно и в процессе сорбции участвует только около 30% всех молекул целлюлозы. Сорбированная (физически связанная) влага в процессе сушки удаляется не полностью. По окончании его материал сохраняет некоторую (хотя и очень незначительную) влажность, называемую остаточной и определяемую режимными параметрами процесса — температурой и остаточным давлением в объеме, где производится сушка. Влияние остаточной влажности при сушке и остаточного давления при пропитке диэлектрика на $\mathrm{tg}\,\delta$, ρ_v и характеристики ЧР показано на рис. 8.5—8.8, из которых следует, что чем меньше остаточная влажность, тем выше электроизоляционные характеристики материала. Поэтому основной задачей термовакуумного процесса является достижение наименьшей остаточной влажности.

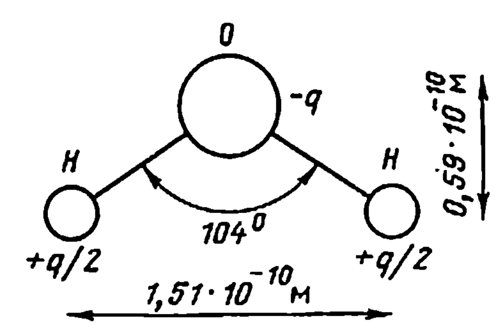


Рис. 18.1. Структура молекулы воды

18.2. ПОГЛОЩЕНИЕ ВЛАГИ МАТЕРИАЛАМИ

Поглощение влаги целлюлозой происходит в два этапа: захват поверхностью целлюлозы молекул воды (т. е. адсорбция или собственно сорбция) и диффузия ее в глубь материала. Одновременно с этим часть сорбированных молекул отдается поверхностью в окружающее пространство. Если количество захватываемых молекул превосходит количество отдаваемых, имеет место сорбция или увлажнение материала; при обратной картине идет процесс десорбции или сушка материала. Когда количество захватываемых и отдаваемых молекул одинаково — наступает равновесие. Количество влаги, поглощенной до наступления равновесия, называется равновесной влажностью. Это есть максимальное количество влаги, которое может быть поглощено материалом при данных физических условиях — относительной влажности (или давлении паров воды) и температуре. Изменяя их, можно изменять количество поглощенной влаги. Наличие газов, как, например, N_2, O_2, CO_2, сорбируемое количество которых в обычных условиях ничтожно мало, не влияет на количество сорбируемой влаги, но влияет на время сорбции. При прочих равных условиях степень размола бумажной массы и плотность бумаги не влияют на конечный результат, но влияют на время сорбции.

При сорбции на поверхности целлюлозы вначале образуется мономолекулярный слой воды, молекулы которого имеют наибольшую энергию связи с целлюлозой, превышающую энергию нормальных ван-дер-ваальсовых связей вследствие полярности взаимодействующих молекул. Свойства воды в этом слое, называемой связанной, существенно отличаются от свойств обычной воды в жидком состоянии или свободной. Плотность связанной воды возрастает, уменьшается теплоемкость, уменьшается упругость насыщенного пара, в связи с чем понижается и точка замерзания. Вторым этапом является образование полимолекулярного слоя воды толщиной от нескольких единиц до нескольких сотен молекул. Энергия связей между последующими слоями воды и целлюлозой уменьшается существенно, и сорбированная вода в этих слоях приобретает свойства свободной воды. Изложенным механизмом объясняется сорбция воды целлюлозой при относительной влажности воздуха до 60%. Дальнейшее насыщение влагой при относительной влажности воздуха более 60% обусловлено конденсацией ее в субмикроскопических и микроскопических порах целлюлозы.

Процесс сорбции обычно изображается изотермами сорбции, выражающими зависимость количества поглощенной влаги от относительной влажности. Для практических целей представляет интерес математическое уравнение сорбции. Наиболее широко известным является уравнение Фрейндлиха

$$V=Ap^n, \quad (18.1)$$

где V — объем сорбированной влаги; p — давление паров воды; A и n — опытные постоянные.

Экспериментальные исследования показали, что применительно к конденсаторным и кабельным бумагам и электрокартонам в диапазоне давлений паров воды $6{,}6\cdot10^{-1}-3{,}33\cdot10^3$ Па ($5\cdot10^{-3}-25$ мм рт. ст.) и температур 296—363 К процесс сорбции описывается уравнением [18.5, 18.6]

$$V=a\exp(-b\Theta)p^{m+q\Theta}, \quad (18.2)$$

где Θ — температура, °С; a, b, m, q — эмпирические коэффициенты, зависящие от физических характеристик материалов.

Подстановкой $A=a\exp(-b\Theta)$ и $n=m+q\Theta$ уравнение (18.2) переводится в (18.1). Коэффициент a возрастает с уменьшением плотности бумаги вследствие увеличения пор (см. гл. 5), что приводит и к уменьшению массы бумаги. Поскольку влажность бумаги выражается обычно в процентах ее сухой массы, то увеличение пор приводит к увеличению влажности. Для оксидных бумаг значение a существенно возрастает по сравнению с неоксидными такой же плотности, что объясняется наличием в них Al_2O_3, являющейся активным сорбентом влаги. Поэтому при уменьшении плотности оксидных бумаг значение a уменьшается вследствие уменьшения содержания Al_2O_3. Коэффициент b практически одинаков для бумаг и картонов и не зависит от их плотности. Таким образом, выражение $A=a\exp(-b\Theta)$ является только функцией температуры. Для большинства бумаг $m\approx0{,}5$ и $q\leqslant0{,}001$. Уравнение (18.2) непригодно для описания изотермы сорбции во всем диапазоне изменения влажности, но оно достаточно для низких давлений водяного пара, представляющих наибольший интерес для силового конденсаторостроения.

Обозначим равновесную влажность целлюлозы при данных условиях через W_0. Скорость сорбции пропорциональна разности между W_0 и влажностью ее в данный момент времени W, и дифференциальное уравнение протекания процесса сорбции имеет вид

$$dW/dt=k_c(W_0-W), \quad (18.3)$$

где k_c — коэффициент сорбции.

Уравнение (18.3) можно записать в виде

$$d(W_0-W)=-k_c(W_0-W)dt. \quad (18.4)$$

Полагая $k_c=\text{const}$, разделяя переменные и интегрируя, получаем

$$\ln(W_0-W)=-k_ct+\ln A_1. \quad (18.5)$$

При $t=0$ $W=W_к$, где $W_к$ — остаточная влажность материала, сохраняющаяся в нем после его сушки, откуда найдем $A_1=W_0-W_к$. Окончательно получаем

$$W=W_к+(W_0-W_к)[1-\exp(-k_c t)], \qquad (18.6)$$

т. е. процесс сорбции протекает во времени по экспоненциальному закону. Это же уравнение остается в силе и при адсорбции.

18.3. ПРОЦЕСС СУШКИ

Сушка целлюлозы также происходит в два этапа: диффузия влаги из внутренних частей целлюлозы к ее поверхности и испарение молекул воды в окружающее пространство или собственно десорбция, называемая также внешним массообменом. Графически процесс десорбции выражается изотермой десорбции, представляющей влажность материала в функции относительной влажности окружающей среды при данной температуре. Как правило, изотермы сорбции и десорбции не совпадают, т. е. имеет место явление сорбционного гистерезиса (рис. 18.2) [18.2]. Как видно из этого рисунка, в гистерезисной петле сорбции — десорбции более высокие значения влажности (равновесной) при данной температуре соответствуют процессу десорбции. Это означает, что коэффициент десорбции меньше коэффициента сорбции. Скорость процесса десорбции пропорциональна количеству содержащейся в целлюлозе в данный момент времени влаги:

$$dW/dt=-k_д W, \qquad (18.7)$$

где $k_д$ — коэффициент десорбции.

Знак минус в правой части означает уменьшение влаги. Полагая, как и выше, $k_д=\text{const}$ и учитывая, что при $t=0$ $W=W_0$, а при $t=\infty$ $W=W_к$, после интегрирования имеем (выкладки опущены)

$$W=W_к+(W_0-W_к)\exp(-k_д t), \qquad (18.8)$$

т. е. процесс десорбции протекает также по экспоненциальному закону.

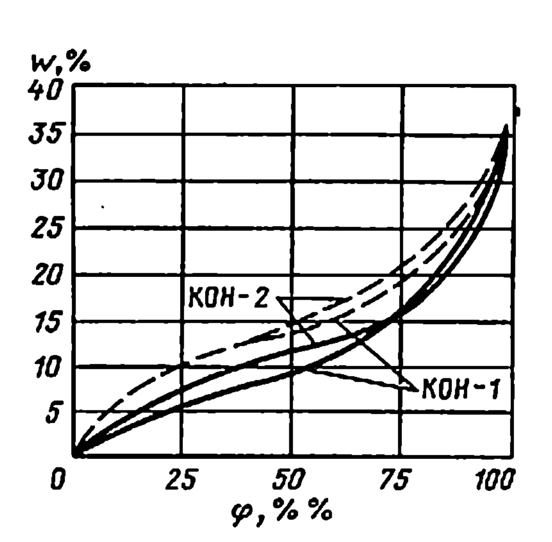


Рис. 18.2. Зависимость равновесного влагосодержания W (в % по весу) от относительной влажности φ окружающего воздуха при 20°С:
——— — сорбция, — — — — десорбция

Величины, обратные коэффициентам сорбции и десорбции, являются постоянными времени этих процессов. Поскольку $k_с > k_д$, то и постоянная времени десорбции больше постоянной времени сорбции. Влияние остаточного давления в сушильном шкафу $p_{ост}$ при сушке конденсаторной бумаги на установившееся значение $\operatorname{tg}\delta$ и на относительное время $t_{отн}$ до наступления его стабилизации (продолжительность сушки) для температуры 100° С иллюстрируют следующие данные:

$p_{ост}$, Па	10^5	30	0,1
$\operatorname{tg}\delta$, 10^{-3}	6	3,5	3
$t_{отн}$	16	6	1

(за единицу принято время при $p_{ост}=0{,}1$ Па). Из изложенного следует, что для получения низких значений $\operatorname{tg}\delta$ и значительного сокращения времени сушки необходимо, чтобы выполнялось условие $p_{ост} \leqslant 0{,}1$ Па.

18.4. ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕЛЛЮЛОЗЫ В ПРОЦЕССЕ СУШКИ

Составной частью сорбционных процессов является диффузия. При сорбции молекулы воды диффундируют с поверхности в глубину целлюлозы, при десорбции — из глубины к поверхности. Процесс диффузии описывается дифференциальным уравнением диффузии

$$\partial W/\partial t = D\Delta W, \tag{18.9}$$

где D — коэффициент диффузии; Δ — оператор Лапласа.

Конструкция секции силового конденсатора такова, что для описания процесса диффузии достаточно одномерного уравнения. В конденсаторной секции жидкая фаза — вода диффундирует в твердом теле — целлюлозе. В общем случае количество диффундирующего вещества обратно пропорционально его вязкости и коэффициент диффузии обратно пропорционален коэффициенту динамической вязкости (см. гл. 6) η:

$$D = A_1/\eta, \tag{18.10}$$

где A_1 — постоянная.

Подставляя в (18.10) η из (6.16а), в котором B характеризует энергию связи между молекулами диффундирующего вещества, получаем

$$D = (A_1/A)\exp(-B/T) = C\exp(-B/T). \tag{18.11}$$

Из (18.11) следует, что с увеличением $T = 273 + \Theta$ значение D возрастает. Это связано с тем, что с увеличением T увеличивается расстояние и уменьшается сила взаимодействия

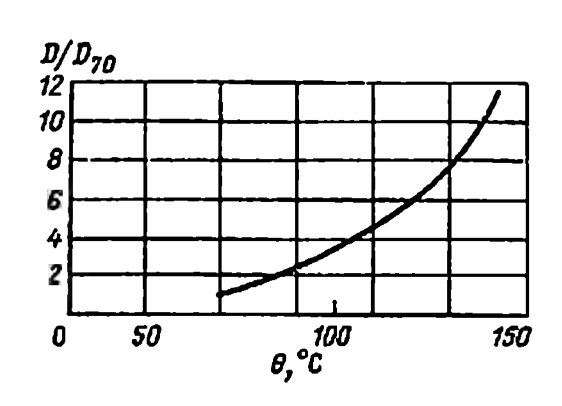


Рис. 18.3. Зависимость коэффициента диффузии воды в целлюлозе от температуры (коэффициент диффузии при $\Theta = 70°$ С D_{70} принят за единицу)

между молекулами воды, с одной стороны, и увеличивается кинетическая энергия молекул воды, с другой, что облегчает их отрыв и переход из одного состояния равновесия в другое. Если диффундирует парогазовая смесь, то при увеличении T увеличивается скорость молекул, что также увеличивает D. На рис. 18.3, построенном по данным [18.7], приведена экспериментальная зависимость коэффициента диффузии воды в кабельной бумаге от температуры, подтверждающая изложенное.

Результатом этого является термодиффузия влаги, заключающаяся в движении влаги в сторону меньших температур. При внешнем нагреве термодиффузия тормозит процесс сушки, который всегда происходит с внешних поверхностей изоляции, имеющих при наружном обогреве более высокую температуру. В связи с этим для ускорения сушки целесообразно создавать внутренние источники тепла в высушиваемом изделии, например, применяя высокочастотный нагрев диэлектрика или нагрев токоведущих частей изделия электрическим током. Последний способ трудно применим к конденсаторам.

Характер процесса диффузии изменяется и в зависимости от влажности материала. При больших влажностях, когда средний свободный пробег λ молекулы воды меньше диаметра поры, диффузионный процесс представляет ламинарное пуазейлево течение. При малых влажностях, когда λ больше диаметра поры, он имеет молекулярный кнудсеновский характер. Коэффициент диффузии воды в целлюлозных материалах по данным [18.8] в условиях вакуума на два порядка выше, чем при атмосферном давлении. Для диапазона влажностей от 0,4 до 4% рост коэффициента диффузии в кабельной бумаге хорошо описывается уравнением [18.6].

$$D \cdot 10^4 = 7{,}5(T/273)^{11{,}7} W + 0{,}016(T/273)^{16}, \qquad (18.12)$$

в котором D получается в см^2/ч. В реальной конденсаторной секции диффузия влаги идет вдоль ее оси по направлению к торцам или обратно, и коэффициент диффузии, помимо прочего, зависит от коэффициента запрессовки [18.9]. С увеличением коэффициента запрессовки D уменьшается. Длитель-

ность сорбционных и десорбционных явлений в решающей степени определяется значением коэффициента диффузии. Поскольку D есть функция влажности, то принятые выше допущения о неизменности значений $k_с$ и $k_д$, куда составной частью входит и коэффициент диффузии, справедливы только для тех диапазонов влажности, где значение D остается практически неизменным.

Изменение коэффициента теплопроводности λ при изменении влажности целлюлозных материалов описывается формулой [18.1]

$$\lambda=\lambda_с(1+\delta u), \qquad (18.13)$$

где $\lambda_с$ — коэффициент теплопроводности сухой бумаги; δ — увеличение коэффициента теплопроводности при увеличении влагосодержания на 1 кг сухого вещества; u — влагосодержание.

Значение $\lambda_с$ является линейной функцией температуры:

$$\lambda_с=\lambda_{с0}+\beta\Theta, \qquad (18.14)$$

где $\lambda_{с0}$ — коэффициент теплопроводности секции в сухом состоянии при $\Theta=0$; β — эмпирический коэффициент, зависящий от природы материала. Значения $\lambda_{с0}$, δ и β приведены ниже

	δ	$\lambda_{с0}$, Вт/(м · °С)	$\beta\cdot10^4$	n	$c_{т0}$, Дж/(кг·°С)
КОН-2	2,05	0,137	0,45	0,29	1220
СИЛКОН-1	2,18	0,101	1,00	0,30	1220
ТЕРОКС-С1	2,32	0,098	1,00	0,30	1220
ТЕРОКС-С 0,8	2,75	0,085	0,40	0,29	1320

Изменение температуры материала не влияет на характер зависимости коэффициента теплопроводности от влагосодержания, и значение δ определяется только структурой и физико-химическими свойствами системы. Удельная теплоемкость $c_т$ секции также изменяется по линейному закону при изменении влажности:

$$c_т=c_{т0}+nu, \qquad (18.15)$$

где $c_{т0}$ — удельная теплоемкость сухой секции; n — эмпирический коэффициент. Значения $c_{т0}$ и n при $k=1$ и $\Theta=25°$ С приведены выше.

18.5. СУШКА И ПРОПИТКА КОНДЕНСАТОРОВ

Процесс сушки должен обеспечить достижение минимального остаточного влагосодержания в диэлектрике, для чего необходимо повышать температуру и снижать остаточное давление в сушильном шкафу. Предел повышения температуры

ограничивается термостабильностью материала диэлектрика, а снижение остаточного давления — техническими возможностями оборудования и экономической целесообразностью. Строгий аналитический учет всех факторов, влияющих на десорбцию влаги, встречает значительные трудности, и поэтому режимы и параметры сушки определяются опытным путем. Наиболее полно характер процесса и его особенности определяются кривыми сушки, представляющими изменение средней влажности материала от времени сушки, или кривой скорости сушки, представляющей изменение скорости сушки от влажности материала [18.1].

Сушка бумажного диэлектрика производится при температуре около 120° С, бумажно-пленочного и пленочного — около 90° С. При остаточном давлении в сушильном шкафу на конечной стадии сушки менее 1 Па остаточная влажность составляет тысячные доли процента. На кривой сушки нельзя указать точку, влагосодержание в которой было бы равно нулю, сколько бы ни повышалась температура и ни увеличивалась длительность сушки. После удаления физически связанной влаги будет выделяться влага, возникающая при разложении целлюлозы, одновременно с которой выделяются также CO и CO_2. При нагревании в вакууме эти продукты выделяются примерно в следующих соотношениях: $10H_2O:2{,}5CO_2:1CO$. Объем паров воды V, мм^3, выделяемых при разложении 1 г бумаги в течение 1 ч, приведенный к 20° С и давлению $98{,}1\cdot10^3$ Па, связан с температурой T эмпирическим соотношением [18.10]

$$\lg V = 20{,}4 - 8{,}5\cdot10^3/T. \qquad (18.16)$$

Температура сушки бумажно-пленочного диэлектрика из полипропиленовой пленки составляет около 95° С, и продолжительность несколько короче, чем бумажного. Сушка пленочного диэлектрика производится при температуре не выше 80° С, и продолжительность ее много меньше, чем бумажного.

По окончании сушки в шкаф, где находятся конденсаторы, заливается предварительно просушенная, обезгаженная и, в случае необходимости, очищенная от загрязнений сорбентами и фильтрацией пропитывающая жидкость, и начинается процесс пропитки.

Сушка и дегазация пропитывающей жидкости обычно производятся при температуре 80° С и при остаточном давлении не ниже давления насыщенных паров жидкости при температуре сушки. Применение более высокой температуры может привести к процессам окисления, а применение более глубокого вакуума — к возгонке отдельных фракций жидкости, что является недопустимым и влечет за собой ухудшение свойств жидкости. Характерные зависимости давления насы-

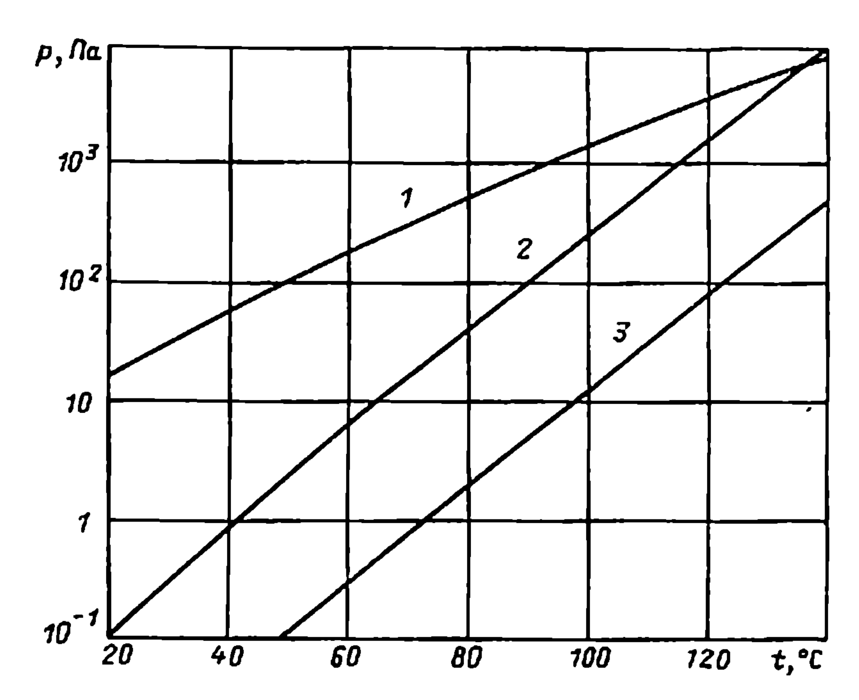


Рис. 18.4. Зависимость давления насыщенного пара пропитывающих жидкостей от температуры:

1 — смесь трихлордифенила с трихлорбензолом; 2 — конденсаторное масло; 3 — трихлордифенил

щенного пара некоторых пропитывающих жидкостей от температуры приведены на рис. 18.4 [1.10].

Пропитка бумажного и бумажно-пленочного диэлектриков представляет процесс заполнения пор или сорбцию пропитывающей жидкости и описывается экспоненциальной зависимостью. Постоянная времени экспоненты, от которой зависит длительность процесса пропитки, определяется параметрами секции (длина, коэффициент запрессовки) и свойствами пропитывающей жидкости, основным из которых является ее вязкость. Поскольку вязкость зависит от температуры, то она также влияет на длительность процесса пропитки. Параметры процессов сушки и пропитки устанавливаются в каждом конкретном случае на основании экспериментальных данных.

Процесс пропитки пленочного диэлектрика является более сложным и состоит из двух элементарных процессов: диффузии пропитывающей жидкости внутрь секции и набухания пленки. Температурный режим пропитки должен выбираться таким, чтобы скорость диффузии жидкости внутрь секции превышала скорость набухания пленки, а время должно быть достаточным для набухания пленки до насыщения. При герметизации конденсатора до наступления насыщения пленки в ходе продолжающегося процесса набухания пленки происходит поглощение ею свободной жидкости, что ведет к уменьшению ее количества и образованию в диэлектрике незаполненного жидкостью свободного пространства с пониженным давлением и пониженной электрической прочностью.

Глава девятнадцатая

ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ. КОНДЕНСАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ И БАТАРЕИ

19.1. КОНДЕНСАТОРЫ В ЭНЕРГЕТИКЕ

При передаче электрической энергии от места ее получения — электрической станции — к потребителю в линиях электропередачи (ЛЭП), распределительных сетях и связанных с ними устройствах теряется в общей сложности более 15% всей вырабатываемой энергии и вопрос снижения потерь приобретает важное экономическое значение. Значительную долю в них составляют потери, обусловленные протеканием реактивного (индуктивного) тока, что, помимо прочего, снижает также устойчивость работы энергосистемы. Снижение его потребления от генератора генерированием реактивной мощности у потребителя является основным путем повышения экономичности энергосистемы и надежности ее работы, а также улучшения качества электрической энергии. Генерирование реактивной мощности у потребителя обычно называют компенсацией реактивной мощности, а наиболее удобным и экономичным источником ее являются конденсаторы, выполняющие функцию энергосберегающего оборудования. В условиях промышленного предприятия конденсаторы, используемые для этих целей, обычно комплектуются в виде небольших батарей, называемых конденсаторными установками. В табл. 19.1 приведены значения реактивной мощности на 1 кВт установленной, которые должны быть подключены для повышения коэффициента мощности от его фактического значения $\cos\varphi_1$ до требуемого $\cos\varphi_2$.

Конденсаторы как источники реактивной мощности используются не только в сетях промышленной частоты, но также и на других частотах, как, например, в электротермических установках на частоты 0,5—10 кГц для нагрева металлов под ковку, штамповку и для закалки, для плавки металлов и некоторых других веществ.

По мере развития ЛЭП, увеличения их протяженности и оснащения автоматикой возникла необходимость в цепях управления ею и в оперативной связи, для чего стали использовать провода самой ЛЭП. Подключение к ЛЭП устройств связи и управления производится с помощью специальных конденсаторов связи, подключающих их непосредственно к фазе ЛЭП и являющихся частью ее оборудования (рис. 19.1). На основе этих конденсаторов разработано устрой-

Таблица 19.1. Реактивная мощность, квар, на 1 кВт установленной

$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$ (желаемый)								
	0,84	0,86	0,88	0,90	0,92	0,94	0,96	0,98	1,00
0,50	1,09	1,14	1,20	1,25	1,31	1,37	1,44	1,53	1,75
0,52	1,00	1,05	1,06	1,11	1,16	1,22	1,28	1,44	1,64
0,54	0,92	0,97	1,02	1,08	1,14	1,20	1,27	1,36	1,56
0,56	0,84	0,89	0,94	1,00	1,05	1,12	1,19	1,28	1,48
0,58	0,76	0,81	0,87	0,92	0,98	1,02	1,11	1,20	1,41
0,60	0,69	0,74	0,80	0,85	0,91	0,97	1,04	1,13	1,33
0,62	0,62	0,67	0,72	0,78	0,84	0,89	0,97	1,06	1,27
0,64	0,56	0,61	0,67	0,72	0,78	0,84	0,91	1,00	1,20
0,66	0,49	0,55	0,60	0,66	0,71	0,78	0,85	0,94	1,14
0,68	0,43	0,49	0,54	0,60	0,65	0,72	0,79	0,88	1,08
0,70	0,38	0,43	0,49	0,54	0,60	0,66	0,73	0,82	1,02
0,72	0,32	0,37	0,32	0,48	0,54	0,67	0,67	0,76	0,97
0,74	0,26	0,33	0,37	0,43	0,48	0,55	0,62	0,71	0,91
0,76	0,21	0,28	0,32	0,37	0,43	0,50	0,56	0,65	0,86
0,78	0,16	0,21	0,27	0,32	0,38	0,44	0,51	0,60	0,80
0,80	0,10	0,16	0,21	0,27	0,33	0,39	0,46	0,55	0,75
0,82	0,05	0,10	0,16	0,22	0,27	0,33	0,40	0,49	0,70
0,84	—	0,05	0,10	0,16	0,22	0,28	0,35	0,44	0,65
0,86	—	—	0,06	0,11	0,17	0,23	0,30	0,39	0,59
0,88	—	—	—	0,06	0,11	0,17	0,25	0,33	0,54
0,90	—	—	—	—	0,06	0,12	0,17	0,25	0,48
0,92	—	—	—	—	—	0,06	0,13	0,22	0,43
0,94	—	—	—	—	—	—	0,07	0,16	0,36

ство отбора небольших мощностей непосредственно от ЛЭП (рис. 19.2), а также измерительное устройство — конденсаторный трансформатор напряжения класса точности 0,5 — для измерения напряжения ЛЭП. Конденсаторы аналогичной конструкции используются в высоковольтных выключателях с большим числом последовательных разрывных промежутков для выравнивания на них напряжения. Конденсаторные батареи широко используются в ЛЭП переменного тока. Они включаются или параллельно (шунтовые), или последовательно в рассечку ЛЭП (сериесные) и служат для повышения передаваемой мощности по ЛЭП и повышения устойчивости работы энергосистемы. Для комплектации шунтовых батарей промышленностью выпускаются стандартные блоки.

Для передачи больших мощностей на дальние расстояния помимо переменного тока высокого напряжения используется также и постоянный ток. Имея ряд преимуществ — развязка по частоте соединяемых энергосистем, снятие проблемы устойчивости параллельной работы, возможность передачи энергии на большие расстояния, отсутствие влияния собственной индуктивности и др.— передача постоянным током требует для своего функционирования и большего объема оборудования,

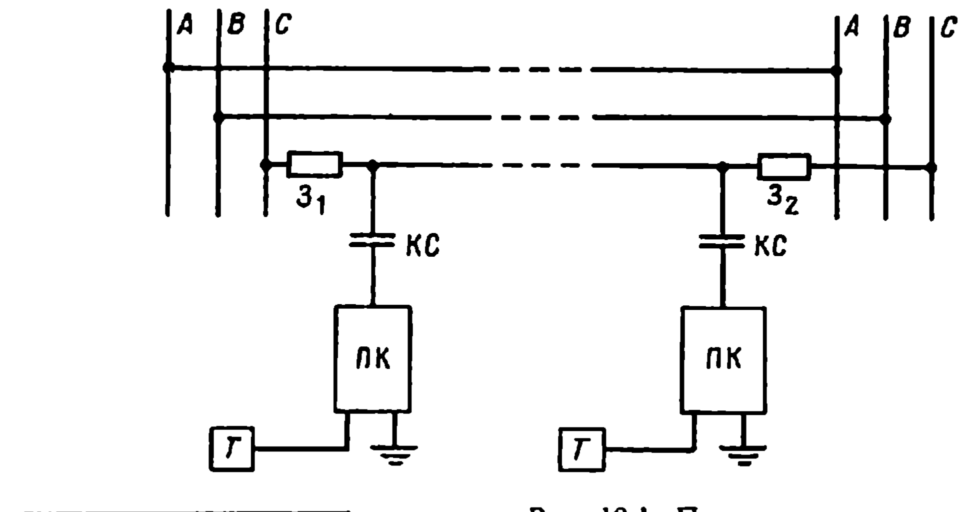


Рис. 19.1. Принципиальная схема канала высокочастотной связи по ЛЭП:
З — заградитель; *КС* — конденсатор связи; *ПК* — полукомплект высокочастотной связи; *Т* — телефон

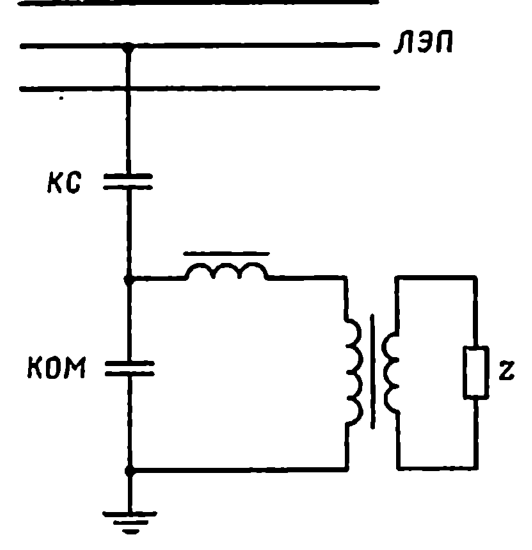


Рис. 19.2. Принципиальная схема отбора мощности от ЛЭП:
КС — конденсатор связи; *КОМ* — конденсатор отбора мощности; *z* — нагрузка

что накладывает определенные ограничения на возможность ее экономически эффективного использования. Большой удельный вес в их оборудовании — около 30% стоимости всей ЛЭП — занимают конденсаторы. Они используются в них в качестве демпфирующих и выравнивающих элементов в преобразовательных устройствах и для комплектации фильтровых и шунтовых батарей как на приемном, так и на передающем концах линии, каждая из которых может иметь по несколько десятков тысяч конденсаторных единиц. На электрифицированном железнодорожном транспорте шунтовые и продольные конденсаторные установки являются составной частью тяговых подстанций [19.1]. Шунтовые установки служат для компенсации реактивной мощности тяговой нагрузки, продольные — для повышения и стабилизации напряжения в условиях непрерывно изменяющейся тяговой нагрузки. В поездах метрополитена конденсаторы используются в схемах безреостатного регулирования частоты вращения тяговых двигателей.

Ассортимент выпускаемых промышленностью для различного применения конденсаторов приведен в [19.2].

19.2. КОНДЕНСАТОРНЫЕ УСТАНОВКИ

Конденсаторная установка представляет собой скомпонованную в виде отдельной конструктивной единицы группу соединенных по определенной схеме конденсаторов, оборудованную регулирующей, коммутирующей, защитной и сигнализационной аппаратурой. В сетях промышленных предприятий конденсаторные установки могут выполнять различные функции (создание симметричного режима, регулирование напряжения и т. д.), но основным их назначением является компенсация реактивной мощности [19.3]. Способы компенсации показаны на рис. 19.3. Наиболее выгодный способ компенсации определяется конкретными условиями данного предприятия, и его выбор производится на основании технико-экономических расчетов. Как правило, компенсация должна производиться в той же сети (на том же напряжении), к которой подключен потребитель, что обеспечивает минимальные потери. Установки

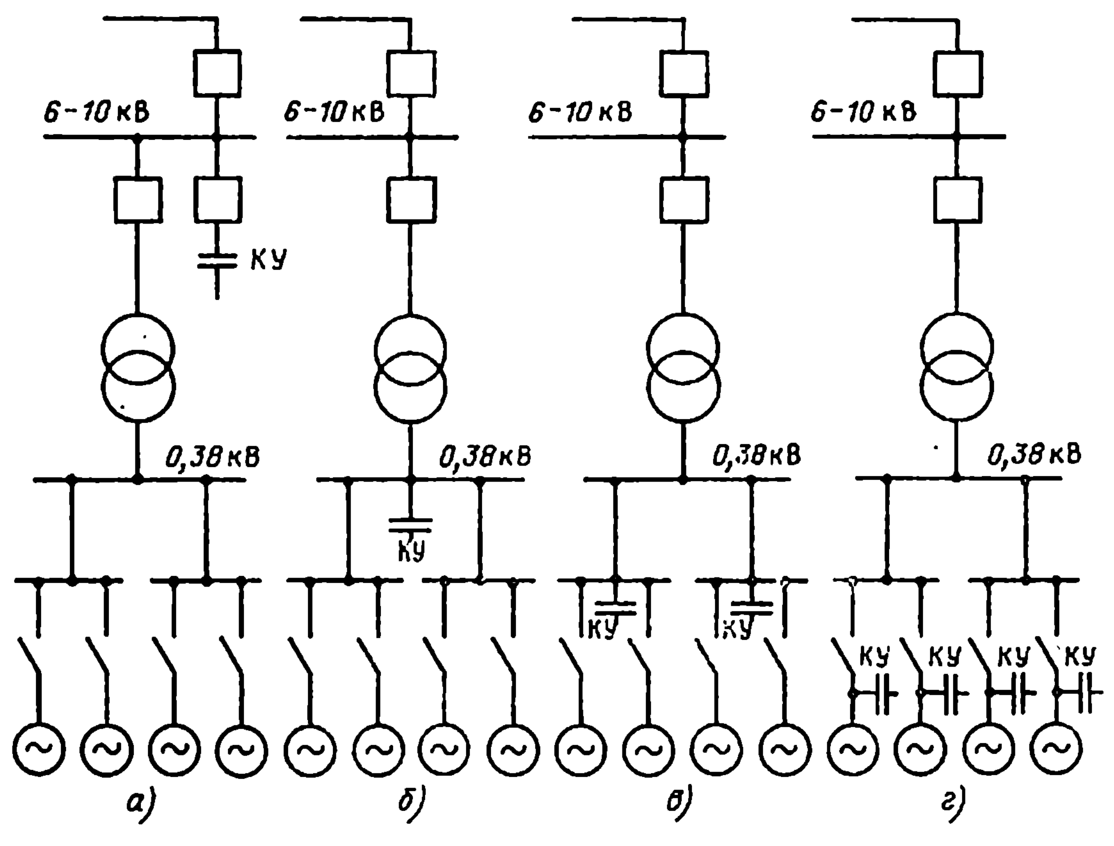


Рис. 19.3. Способы компенсации реактивной мощности в сетях промышленных предприятий:

а — централизованный на стороне высшего напряжения; *б* — то же на стороне низшего напряжения; *в* — групповой; *г* — индивидуальный; *КУ* — конденсаторная установка

могут быть регулируемыми, т. е. состоящими из нескольких ступеней, подключаемых по мере необходимости, нерегулируемыми и комбинированными, т. е. содержащими регулируемую и нерегулируемую части.

При выборе мощности конденсаторной установки и места размещения ее в распределительной сети должны учитываться: а) номинальное напряжение сети и его допустимые колебания; б) графики потребляемой реактивной мощности и характеристики основных потребителей; в) отключающая способность коммутационной аппаратуры; г) возможность возникновения резонансных явлений; д) экономический эффект от ее использования; е) применение автоматического регулирования мощности установки; ж) потребность в реактивной мощности не только в системе в целом, но и для всего района с учетом необходимого резерва; з) возможность регулирования напряжения с помощью трансформаторов с регуляторами напряжения под нагрузкой и конденсаторной установки; и) номенклатура выпускаемых промышленностью комплектных конденсаторных установок. Размещение конденсаторных установок наиболее выгодно вблизи мест потребления реактивной мощности.

Схемы соединения конденсаторов в фазе конденсаторной установки зависят от ее номинального напряжения. Конденсаторы с номинальным напряжением ниже 1000 В выпускаются только трехфазными с соединением фаз треугольником. Поэтому конденсаторные установки на эти напряжения могут быть выполнены только трехфазными с соединением фаз треугольником. Конденсаторы на номинальное напряжение от 1 до 10 кВ выпускаются, как правило, однофазными, и соединение их в установке на соответствующее номинальное напряжение может быть как звездой, так и треугольником с параллельным соединением конденсаторов в фазе с предохранителями индивидуальной или групповой защиты конденсаторов. В установках на номинальное напряжение свыше 10 кВ соединение фаз производится звездой со смешанным соединением конденсаторов в фазе (рис. 19.4).

В осветительных и силовых сетях низкого напряжения (220 и 380 В) применяются, как уже отмечалось выше, главным образом трехфазные установки; однофазные установки применяются только для индивидуальных однофазных приемников. В осветительных сетях они обычно подключаются непосредственно (без выключателя) после выключателя осветительной сети (рис. 19.5, *а*). В силовых сетях трехфазные установки могут подключаться как непосредственно, через общий с приемником выключатель, так и через отдельный выключатель к шинам распределительных щитов напряжением 380 В (рис. 19.5, *б*—*д*). В трехфазных установках на напряжения 3, 6 и 10 кВ основной

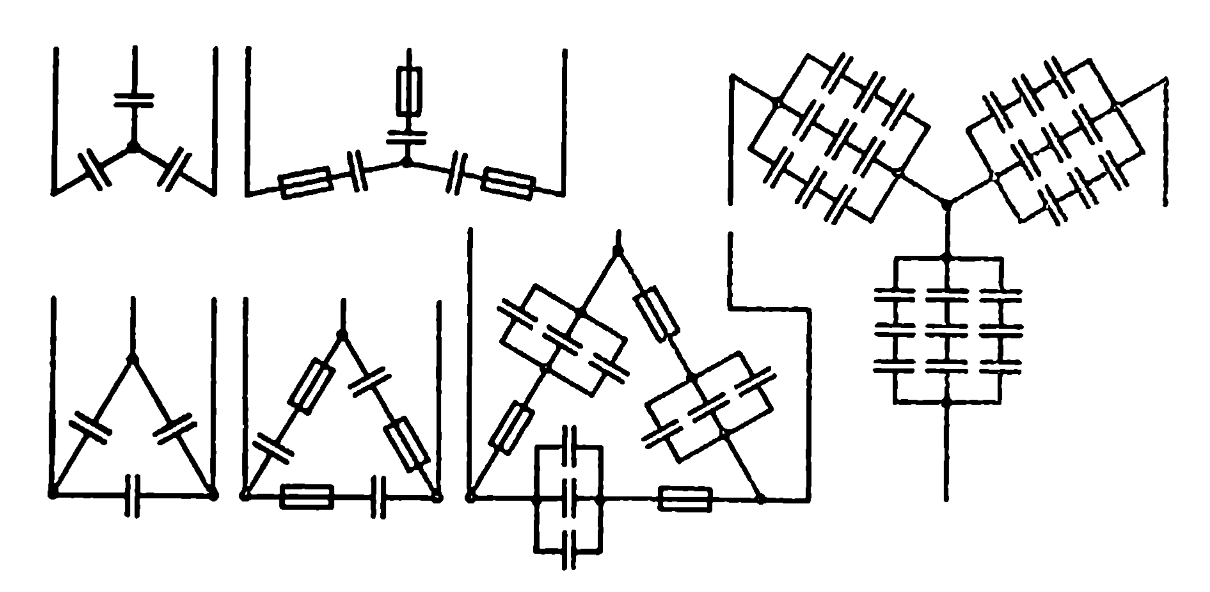


Рис. 19.4. Схемы соединения конденсаторных установок

а) б) в) г) д)

Рис. 19.5. Схемы присоединения установок к сети 380 В:
а, б — с общим выключателем; *в* — с рубильником и предохранителем; *г* — с предохранителем и контактором; *д* — с автоматическим выключателем

схемой соединения фаз является треугольник с параллельным соединением конденсаторов в фазе (рис. 19.6, *а*).

Если конденсаторные установки на эти напряжения комплектуются из однофазных конденсаторов с номинальными напряжениями 660 и 1050 В, то применяется смешанное соединение их в фазе, выполняемое обычно в виде звезды

или двойной звезды (рис. 19.6, *б*, *в*). Поскольку при соединении звездой один из выводов конденсатора может соединяться с землей, для комплектования этих установок могут применяться конденсаторы с одним изолированным выводом. В более мощных конденсаторных установках или при необходимости регулирования их мощности применяются секционированные схемы с разделением их на ступени, как показано на рис. 19.7.

Параметры коммутирующей аппаратуры и защита конденсаторных установок выбираются с учетом того, что коммутация может происходить при наличии уже включенных ранее и работающих параллельно с коммутируемой установок или ступеней. В этом случае амплитуда переходного тока существенно больше, чем при коммутации одиночной установки при отсутствии параллельно включенных. При отключениях на конденсаторах или установках возможны перенапряжения, связанные с повторным зажиганием дуги между контактами коммутирующего аппарата. В процессе отключения, после гашения дуги в коммутирующем аппарате (выключателе), напряжение на конденсаторе (установке) остается неизменным, близким к амплитуде приложенного напряжения, поскольку гашение тока батареи в выключателе происходит в момент прохождения его через нуль, что соответствует прохождению напряжения на установке через максимум, а время разряда установки, составляющее сотни и более секунд, значительно больше периода промышленной частоты. В дальнейшем напряжение сети продолжает изменяться по синусоидальному закону и через половину периода достигает между контактами выключателя двойного амплитудного значения напряжения сети. При повторном пробое (зажигании дуги) между контактами выключателя на отключаемой установке возникают трехкратные перенапряжения. Дальнейшее увеличение числа повторных зажиганий между контактами выключателя может увеличить кратность перенапряжений. Поэтому для ограничения перенапряжений в конденсаторных установках целесообразно использовать коммутационные аппараты, не имеющие повторных зажиганий дуги. При переходном процессе возникают также броски тока, значительно превосходящие номинальный ток установки.

После отключения от сети на конденсаторах установки в течение довольно длительного времени сохраняется напряжение, равное мгновенному значению напряжения сети в момент отключения. Это напряжение и соответствующий ему заряд могут представлять опасность для обслуживающего персонала. Поэтому должны применяться специальные меры для быстрого снижения напряжения до безопасного значения. При использовании конденсаторов со встроенными разрядными сопротивлениями их разряд происходит через эти сопротивления. Если

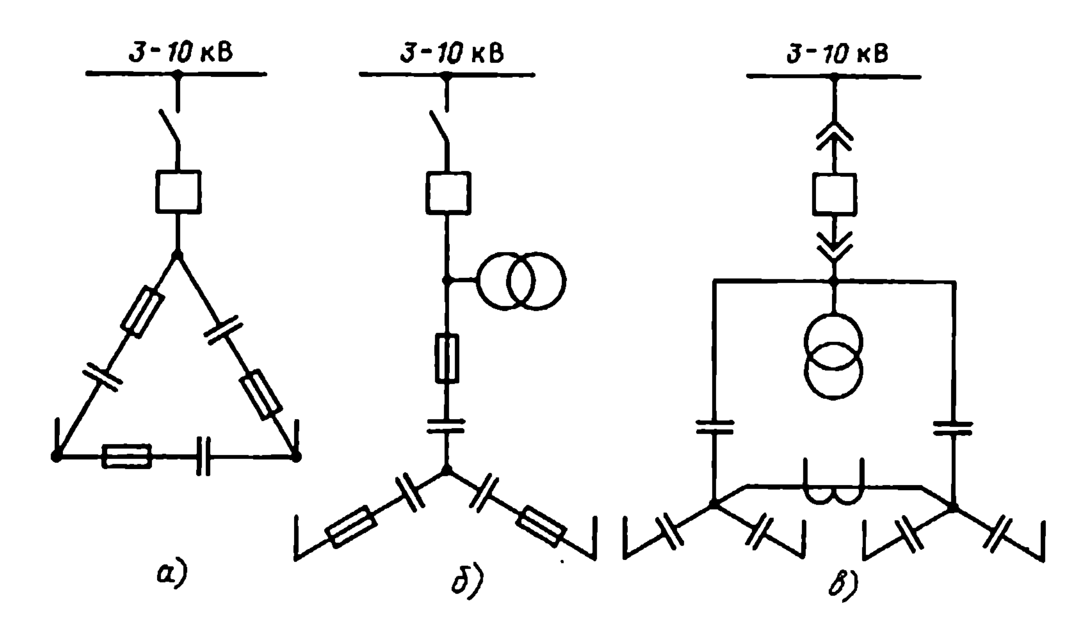


Рис. 19.6. Схемы присоединения установок к сети 3—10 кВ:
а — с выключателем и конденсаторами со встроенными разрядными сопротивлениями; *б* — с выключателем и трансформаторами напряжения для разрядки; *в* — двойной звездой с выкатным выключателем

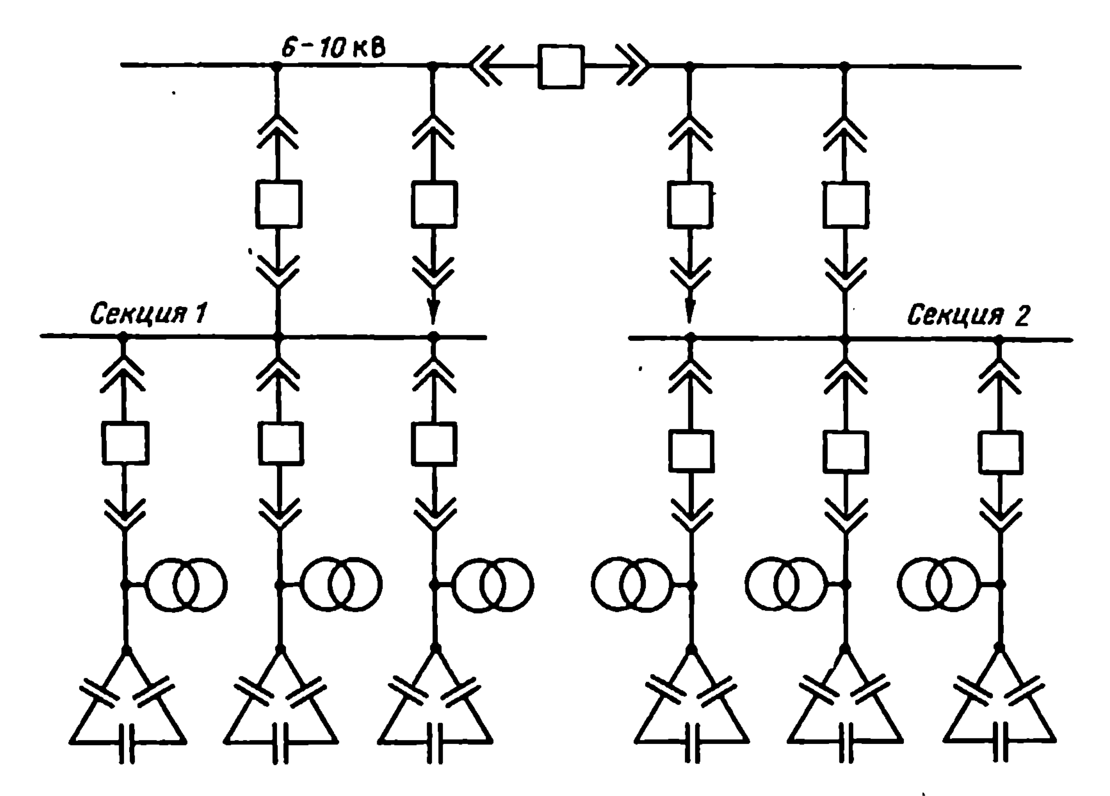


Рис. 19.7. Схемы двухсекционной установки на напряжение 6—10 кВ с тремя ступенями в каждой секции

конденсаторы не имеют внутренних разрядных сопротивлений, разрядные устройства должны быть предусмотрены в схемах установки, как показано на рис. 19.8.

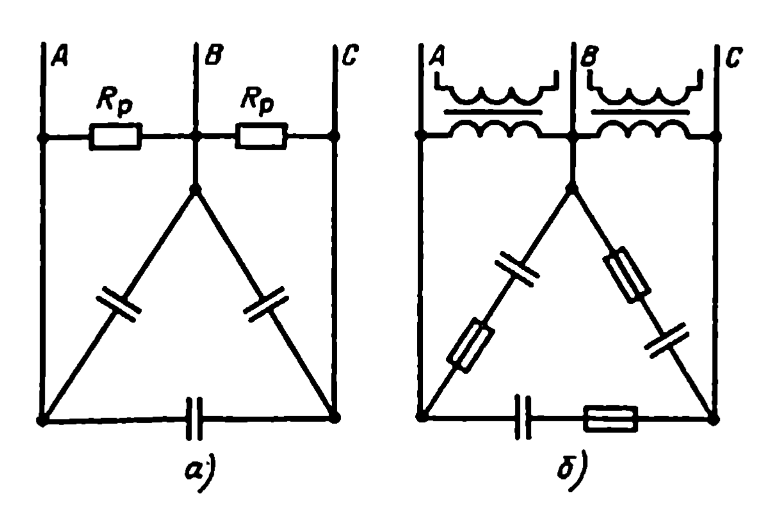


Рис. 19.8. Схемы устройств для разрядки установок:
а — с помощью разрядных резисторов R_p при $U_{ном} < 1000$ В; *б* — с помощью трансформаторов напряжения при $U_{ном} > 1000$ В

Для установок напряжением до 1000 В в качестве разрядных устройств рекомендуется применять резисторы (рис. 19.8, *а*), свыше 1000 В — однофазные трансформаторы напряжения или индуктивные сопротивления (рис. 19.8, *б*), включаемые по схеме открытого треугольника. При секционировании установок для многоступенчатого регулирования каждая секция или ступень с отдельным выключателем должна иметь свое разрядное устройство.

Наиболее экономичный режим работы сети может быть достигнут регулированием мощности конденсаторной установки, осуществляемым подключением или отключением всей установки или ее ступеней. Наиболее эффективно ступенчатое регулирование. Число ступеней регулирования определяется по усредненным графикам нагрузки. Батареи конденсаторов могут быть использованы также как средство регулирования напряжения в точке присоединения. Регулирующий эффект или процентное изменение напряжения при включении одной ступени равно:

$$\Delta U = QX_э/(10U^2_{ном}), \tag{19.1}$$

где Q — реактивная мощность ступени, квар; $U_{ном}$ — номинальное напряжение сети, кВ; $X_э$ — эквивалентное реактивное сопротивление элементов сети, ближайших к установке, Ом. Максимальные ступени увеличения напряжения при включении установки во избежание его резких колебаний не должны превосходить 1—2% номинального. Обычно число ступеней составляет от 3 до 5. Регулирование может быть ручным, осуществляемым обслуживающим персоналом, и автоматическим. Наиболее гибким и удобным является автоматическое регулирование, при котором осуществляется непрерывное слежение за регулируемым параметром или параметрами (при

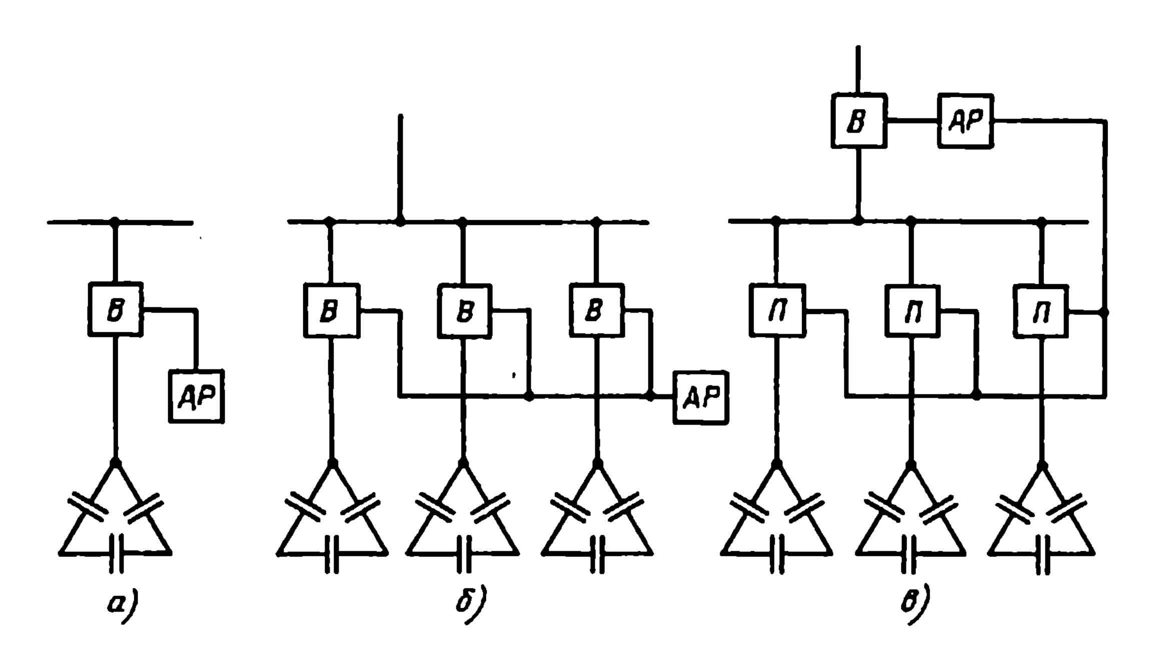


Рис. 19.9. Схемы автоматического регулирования мощности установок:
а — одноступенчатая; *б*, *в* — многоступенчатые с переключением ступеней в бестоковую паузу; *В* — выключатель; *П* — переключатель; *АР* — автоматический регулятор

регулировании по нескольким параметрам одновременно) и воздействие на него при его отклонении от заданного значения подключением или отключением ступеней конденсаторной установки. Принципиальные схемы подключения к сети установок с автоматическим регулированием показаны на рис. 19.9. Регулирование может производиться по следующим параметрам: по напряжению, по значению и направлению реактивной мощности, по времени суток, по току нагрузки, по коэффициенту мощности, по изменению температуры, по нескольким параметрам одновременно. Параметр, по которому должно производиться регулирование, зависит от характеристик сети и определяется потребителем.

Конструкция установки должна соответствовать требованиям ПУЭ и обеспечивать отвод выделяемого в конденсаторах тепла. Промышленностью выпускаются комплектные конденсаторные установки, представляющие собой в большинстве случаев набор закрытых металлических шкафов, в которых размещаются конденсаторы, а также коммутирующая, регулирующая и защитная аппаратура. Для пуска установки в эксплуатацию потребителю необходимо только подключить ее к сети. Ассортимент выпускаемых промышленностью комплектных конденсаторных установок приводится в [19.2].

19.3. ШУНТОВЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ БАТАРЕИ

Для улучшения использования генераторов и трансформаторов (разгрузка их от выработки и трансформирования реактивной мощности) и снижения потерь энергии в энергетических

системах применяются шунтовые конденсаторные батареи. Для комплектации типовых шунтовых батарей на напряжения 6, 10, 35 и 110 кВ используются выпускаемые промышленностью готовые блоки конденсаторов типа БКЭ. Номинальные данные их приведены в § 19.6. В мощных батареях обычно используются те же конденсаторы, которые применяются в батареях продольной компенсации реактивного сопротивления линий электропередачи. Конденсаторные батареи могут состоять из многих тысяч конденсаторов, и для повышения их надежности целесообразно использовать конденсаторы со встроенными плавкими предохранителями, отключающими секцию при ее пробое. Использование конденсаторов со встроенными предохранителями предъявляет дополнительные требования к схемам их соединения в батареях.

Схемы соединения конденсаторов в батареях. В связи с тем что в конденсаторных батареях возможно сложное последовательно-параллельное соединение конденсаторов, необходимо обеспечить надежное срабатывание плавких предохранителей от энергии, запасенной в остальных неповрежденных секциях данного конденсатора. Лучше всего это обеспечивается при параллельном соединении секций в конденсаторе. Так как обычно номинальное напряжение секции близко к 1 кВ, то и номинальное напряжение конденсаторов, используемых для комплектации шунтовых батарей, также близко к 1 кВ.

В ряде случаев для комплектации конденсаторных батарей используются конденсаторы на напряжение более 1 кВ. Так как в этих конденсаторах секции включаются как параллельно, так и последовательно, то в них обычно не применяются встроенные плавкие предохранители, так как их надежное срабатывание может быть обеспечено лишь при большом количестве секций, включенных параллельно. В этом случае для отключения поврежденных конденсаторов используются внешние предохранители. Однако эти предохранители нечувствительны к пробою одной секции вследствие недостаточного изменения тока при нескольких последовательно соединенных секциях и срабатывают при пробое всех последовательно соединенных секций.

Чаще всего, однако, пробой одной секции в последующем приводит к выходу всего конденсатора из строя вследствие порчи пропитывающего состава длительно существующим дуговым разрядом, возникающим в поврежденной секции.

При использовании в батареях конденсаторов на напряжение более 1 кВ и внешних предохранителей усложняется эксплуатация батареи, так как необходимо обеспечить регулярный (не реже 1 раза в сутки) осмотр батареи с заменой отключенных конденсаторов, чтобы не вызвать существенной перегрузки оставшихся.

Рассмотрим возможные схемы соединения конденсаторов в батареи (рис. 19.10). Обозначим n количество последовательно соединенных конденсаторов или рядов параллельно соединенных конденсаторов в ряде. Общее количество конденсаторов в батарее равно nm, при этом [19.4]

$$n = U_{\text{раб. наиб. б}} k_4 / (U_{\text{ном. к}} k_1 k_2 k_3), \qquad (19.2)$$

где $U_{\text{раб. наиб. б}}$ — наибольшее рабочее напряжение батареи; $U_{\text{ном. к}}$ — номинальное напряжение конденсатора; $k_1 < 1$ — коэффициент, учитывающий наличие гармонических в сети; $k_2 < 1$ — коэффициент, учитывающий возможную перегрузку конденсатора за счет разброса в значениях емкости (при последовательном соединении конденсаторов или рядов конденсаторов); $k_3 < 1$ — коэффициент, учитывающий изменение емкости конденсаторов или рядов параллельно соединенных конденсаторов из-за перегорания предохранителей; $k_4 > 1$ — коэффициент, учитывающий повышение напряжения на батарее при наличии включенного последовательно с батареей реактора.

Обычно $k_2 = 0{,}95 \div 0{,}98$; $k_3 = 0{,}9 \div 0{,}98$ в зависимости от схемы соединения батареи.

При выборе схемы соединения конденсаторов в батарее необходимо учитывать следующие обстоятельства.

1. Максимальное число параллельно соединенных конденсаторов ограничивается энергией W_r, которая выделяется в пробитом конденсаторе в случае затягивания отключения пробитой секции встроенным плавким предохранителем или отказа в его работе. Эта энергия не должна приводить к разрушению корпуса конденсатора, что может привести к пожару на батарее.

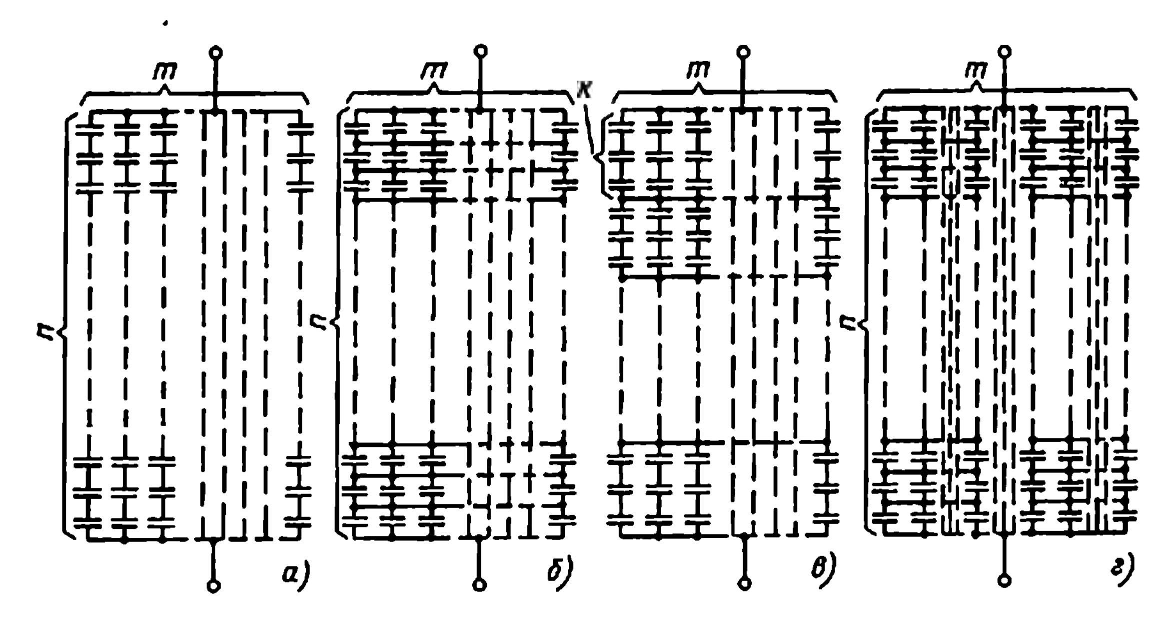


Рис. 19.10. Схемы соединения конденсаторов в батарее

В случае m конденсаторов, соединенных параллельно, в конденсаторе выделяется энергия, запасенная в поврежденном конденсаторе и в остальных $m-1$ параллельно соединенных конденсаторах:

$$W_r = mC_к U_к^2/2,$$

где $C_к$ — емкость конденсатора; $U_к$ — напряжение на конденсаторе в момент повреждения (амплитудное значение).

В случае соединения n конденсаторов последовательно в цепочке и m цепочек параллельно (рис. 19.10, *а*) в поврежденном конденсаторе выделяется энергия, запасенная в нем, а также энергия, определяемая перезарядкой оставшихся $n-1$ конденсаторов, включенных последовательно с поврежденным, с напряжения $U_к(n-1)$ до напряжения $U_к n$. Эта энергия много меньше энергии, запасенной в одном конденсаторе. В общем случае при соединении конденсаторов по схеме рис. 19.10, *в* (перемычки устанавливаются через каждые k конденсаторов) энергия, выделенная в поврежденном конденсаторе [19.4],

$$W_r = \frac{C_к U_к^2}{2} \cdot \frac{nm}{nm - n(m-1)/k}. \qquad (19.3)$$

Энергия, приводящая к разрушению корпуса конденсатора, зависит от места повреждения. Наиболее опасен пробой изоляции на корпус под крышкой конденсатора, так как это повреждение не ликвидируется плавкими вставками секций и приводит к разрушению изоляторов. Допустимое значение энергии, выделяющейся при повреждении конденсатора (при пробое секций или изоляции относительно корпуса), для конденсаторов типа КСП\ или КСК2 равно 8 кДж.

2. При отключении пробитых секций встроенными плавкими предохранителями в конденсаторе уменьшается емкость и возрастает емкостное сопротивление. При последовательно соединенных конденсаторах это приводит к перегрузке по напряжению поврежденного конденсатора, причем коэффициент перегрузки

$$k_з = \frac{k}{1 + C'_к(k-1)/C_к} = \frac{k}{k - \Delta C_к(k-1)/C_к}, \qquad (19.4)$$

где k — количество последовательно соединенных конденсаторов в цепочке; $C'_к$ — емкость поврежденного конденсатора; $C_к$ — емкость каждого из неповрежденных конденсаторов; $\Delta C_к = C_к - C'_к$ — изменение емкости конденсатора вследствие отключения пробитых секций.

Как следует из (19.4), с увеличением числа последовательно соединенных конденсаторов в цепочке увеличивается коэффициент перегрузки $k_з$.

При m параллельно включенных конденсаторов в ряду и n последовательно соединенных рядов коэффициент перегрузки при отключении пробитых секций встроенными плавкими вставками

$$k_3 = \frac{n}{n - \Delta C_к (n-1)/(C_к m)}. \qquad (19.5)$$

Как следует из (19.5), коэффициент перегрузки уменьшается при увеличении m и возрастает с увеличением n.

3. При наличии внешних предохранителей минимальное число параллельно включенных конденсаторов определяется допустимой длительной перегрузкой оставшихся конденсаторов при отключении предохранителем поврежденного. Коэффициент перегрузки оставшихся конденсаторов

$$k_3 = nm/[n(m-1)+1]. \qquad (19.6)$$

При $m > 1$

$$k_3 \approx m/(m-1). \qquad (19.7)$$

Формулы (19.6) и (19.7) показывают, что в рассматриваемом случае k_3 существенно снижается с ростом m.

4. При отключении пробитой секции встроенным плавким предохранителем на поврежденном конденсаторе и на конденсаторах (или группах конденсаторов), включенных последовательно с поврежденным, возникает постоянная составляющая, значение которой равно снижению напряжения на поврежденном конденсаторе при разряде его на пробитую секцию до момента отключения пробитой секции плавким предохранителем (рис. 19.11). Если в батарее перемычки устанавливаются через каждые k конденсаторов, включенных последовательно, т. е. нет параллельно включенных конденсаторов, то при пробое секции (включение контактора) емкость одного конденсатора успевает почти полностью разрядиться на пробитую секцию до момента срабатывания плавкого предохранителя, при этом остальные $k-1$ конденсаторов подзаряжаются до напряжения цепочки, состоящей из k последовательно соединенных конденсаторов. После перегорания плавкого предохранителя емкость поврежденного конденсатора восстанавливается (отключение контактора) и напряжение на конденсаторах изменяется по прежнему синусоидальному закону, но при наличии постоянной составляющей U_0, равной по значению спаду напряжения на емкости $C_1 = C_к$. Если пробой секции произошел на амплитуде $U_{m1} = U_{mk}$ напряжения, приложенного к конденсатору C_1, и поврежденный конденсатор полностью разрядился на пробитую секцию, то $U_0 \approx U_{m1}$ (рис. 19.11, *б*) и

$$u_1 = U_{m1} \cos \omega t - U_0 = U_{m1} (\cos \omega t - 1), \qquad (19.8)$$

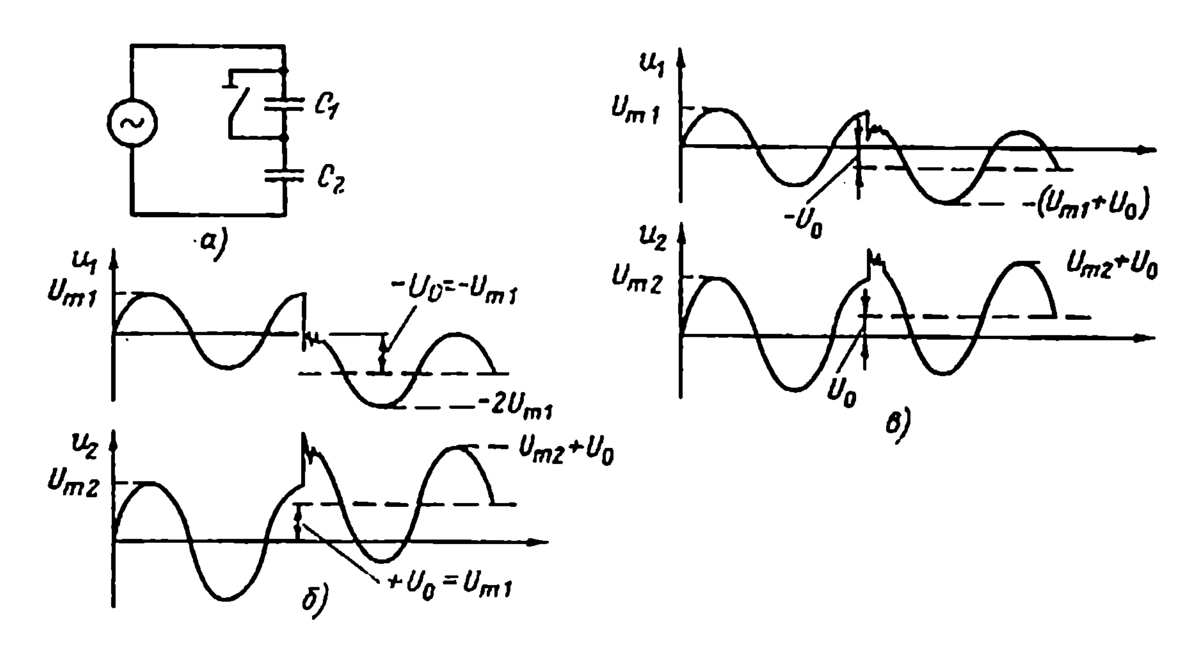


Рис. 19.11. Изменение напряжения на конденсаторах при пробое секции в одном из них и последующем отключении ее встроенным плавким предохранителем:

а — принципиальная схема; *б* — при полном разряде емкости конденсатора C_1; *в* — при частичном разряде емкости конденсатора C_1

при этом максимальное напряжение на поврежденном конденсаторе достигает двойного амплитудного значения. На остальных $k-1$ конденсаторах напряжение изменяется по закону

$$u_2 = U_{m2} \cos \omega t + U_0, \qquad (19.9)$$

причем на каждом из конденсаторов напряжение в $k-1$ раз меньше.

Постоянная составляющая в начальный период времени равномерно распределяется между этими $k-1$ конденсаторами. В последующем распределение постоянной составляющей определяется утечками и может привести к случайным перегрузкам отдельных конденсаторов.

Постоянная составляющая может существовать на конденсаторах значительное время, так как постоянная времени ее спада

$$\tau = R_{\text{из.к}} C_{\text{к}} = \rho_v \varepsilon, \qquad (19.10)$$

где $R_{\text{из.к}}$ и $C_{\text{к}}$ — соответственно сопротивление изоляции и емкость конденсатора; ρ_v и ε — соответственно удельное объемное сопротивление и диэлектрическая проницаемость изоляции конденсатора.

Обычно значения τ составляют тысячи секунд. При увеличении числа параллельно соединенных конденсаторов эта группа конденсаторов не успевает полностью разрядиться на пробитую секцию и U_0 уменьшается (рис. 19.11, *в*).

Рассмотрим достоинства и недостатки схем соединения конденсаторов в батарее, приведенных на рис. 19.10. Схема рис. 19.10, *а*, состоящая из m параллельных цепочек конденсаторов, в каждой из которых n конденсаторов соединены последовательно, имеет одно преимущество, заключающееся в том, что при отказе плавкого предохранителя или пробое на корпус в конденсаторе выделяется энергия, запасенная практически только в этом конденсаторе, $W_к$. Однако эта схема имеет ряд существенных недостатков: при отключении пробитых секций плавкими предохранителями на поврежденном конденсаторе возникают наибольшие перегрузки по напряжению и наибольшие значения постоянной составляющей.

Схема рис. 19.10, *б*, состоящая из m параллельно включенных конденсаторов и n последовательно соединенных групп (перемычки через каждый конденсатор), приводит при отключении пробитых секций плавкими предохранителями к наименьшим перегрузкам и наименьшей постоянной составляющей для поврежденного конденсатора. Однако основным недостатком этой схемы является большая энергия, выделяющаяся в поврежденном конденсаторе при отказе плавкой вставки или пробое на корпус, приблизительно равная $mW_к$, что может вызвать взрыв и пожар на батарее.

В связи с изложенным при соединении конденсаторов в батарее либо ставят перемычки через каждые k конденсаторов (см. рис. 19.10, *в*) (обычно $k=2$), либо число параллельно соединенных конденсаторов m_1 ограничивается условием предельной энергии, которая может быть выделена в поврежденном конденсаторе (8 кДж) при перенапряжениях на батарее (2—2,5) $U_{ном}$. Значение m_1 обычно колеблется в пределах 8—10. Схема такого соединения приведена на рис. 19.10, *г*.

Перенапряжения на шунтовых батареях конденсаторов. Шунтовые батареи конденсаторов, подключенные к шинам подстанции, подвержены воздействию внутренних перенапряжений, возникающих на шинах. Так как перенапряжения обычно носят высокочастотный характер (сотни и тысячи герц), а эквивалентное емкостное сопротивление батареи уменьшается с ростом частоты (обратно пропорционально частоте), то обычно кратность внутренних перенапряжений на батареях не превосходит 2—2,5 по отношению к амплитуде фазного рабочего напряжения $U_ф$.

Перенапряжения могут возникать также при включениях или отключениях батареи или части батареи [19.4].

При включении батареи перенапряжения могут достигать двойного амплитудного значения напряжения сети в момент включения ($2U_{фm}$). Если на батарее остался заряд от предшествующего режима работы и момент включения совпал с противоположными знаками мгновенного напряжения сети

и оставшегося напряжения на батарее, то перенапряжения могут достигать больших значений (до $3U_{фm}$).

Включение батареи сопровождается большими импульсами тока, превышающими в 5—15 раз амплитудное значение номинального тока при отсутствии заряда на батарее и в 10—30 раз при наличии заряда с напряжением, противоположным по знаку мгновенного напряжения сети в момент включения.

Если к сети ранее подключена другая батарея (или часть батареи), то ток включения еще более возрастает и может превышать амплитудное значение номинального тока в 20—250 раз. Это может приводить к перегоранию внешних предохранителей конденсаторов.

При отключении батареи наибольшие перенапряжения возникают при наличии повторных зажиганий дуги между контактами включателя, при этом перенапряжения могут достигать значений до (3—3,5) $U_{фm}$. Повторные зажигания дуги в выключателях также сопровождаются большими импульсами тока в конденсаторах батареи.

Основным мероприятием, ограничивающим перенапряжения при включении батареи, являются устройства, позволяющие быстро разрядить батарею после отключения. Это позволяет не иметь остаточного заряда на батарее в момент последующего включения. Для разряда конденсаторной батареи обычно применяются трансформаторы напряжения, постоянно подключенные к батареям.

Для батарей с заземленной нейтралью трансформаторы напряжения соединяются звездой с заземленной нейтралью. Для батарей с изолированной нейтралью трансформаторы напряжения соединяются по схеме открытого треугольника.

Для ограничения перенапряжений при отключении батареи целесообразно использовать выключатели, не имеющие повторных зажиганий дуги (воздушные выключатели, выключатели с шунтирующими сопротивлениями).

Для ограничения импульсов тока, возникающих как при включениях, так и при отключениях батареи, целесообразно использовать токоограничивающие реакторы, которые обычно включаются со стороны нейтрали. Так как большие импульсы тока, имеющие значительную скорость изменения тока i во времени t (большие di/dt), могут привести к перенапряжениям на реакторах, то должна быть предусмотрена защита реакторов от перенапряжений разрядником, соответствующим классу реактора. Обычно реактор, включаемый со стороны нейтрали, выбирается на номинальное напряжение на класс ниже номинального напряжения сети, в которой работает батарея конденсаторов.

При установлении допустимого напряжения на конденсаторах, работающих в батареях, и соответственно при выборе

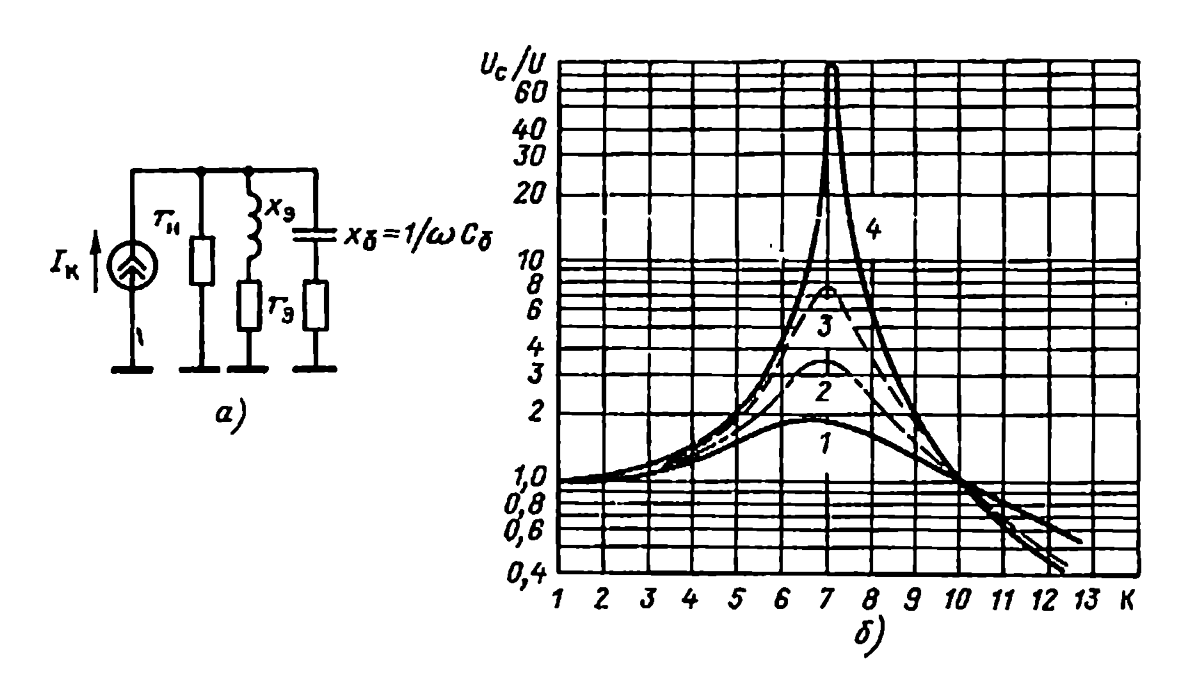


Рис. 19.12. Эквивалентная схема сети с включенной шунтовой батареей конденсаторов (*а*) и изменение амплитуды гармоники в области резонанса на 7-ю гармонику для различных активных сопротивлений нагрузки $r_н$ (*б*): *1—3* — соответственно при $r_н$, равном 50, 100, 250 Ом; *4* — при отсутствии нагрузки

схемы соединения конденсаторов необходимо учитывать наличие высших гармонических в кривых напряжения и тока, с тем чтобы действующее значение тока в конденсаторе и потери энергии (активная мощность) в конденсаторе не превышали предельно допустимых значений при длительной работе ($I_{доп} \leqslant 1{,}3 I_{ном}$ и $P_{доп} \leqslant 1{,}44 P_{ном}$). При расчетах следует иметь в виду, что в реальных цепях ток и мощность, выделяемая в конденсаторе, в ряде случаев могут значительно возрасти вследствие возникновения резонансных явлений (резонанс токов) на одну или несколько высших гармонических [19.5].

Номер гармоники, на которой возникает резонанс токов, можно определить по формуле

$$k=\sqrt{1/(\omega_{ном} C_б x_э)}, \qquad (19.11)$$

где $x_э$ — эквивалентное индуктивное сопротивление сети при промышленной частоте $f_{ном}=\omega_{ном}/2\pi$; $C_б$ — емкость батареи конденсаторов.

Следует учесть, что $x_э$ является эквивалентным сопротивлением параллельного соединения индуктивных сопротивлений питающей сети и нагрузки.

Возникновение резонанса приводит к значительному возрастанию напряжения высших гармоник на конденсаторе, тока высших гармоник и потерь на высшие гармонические в конденсаторе (рис. 19.12). Это может привести к недопустимому

длительному перегреву конденсатора и выходу его из строя либо в результате теплового пробоя, либо в результате ускоренного старения диэлектрика.

Отсутствие резонанса на высшие гармонические должно быть обеспечено как для батареи в целом, так и в процессе ступенчатого регулирования мощности конденсаторной батареи.

19.4. БАТАРЕИ ПРОДОЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ (СЕРИЕСНЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ БАТАРЕИ)

Батареи продольной компенсации применяются для увеличения пропускной способности линий электропередачи, что достигается за счет компенсации индуктивного сопротивления линии.

Активная мощность, передаваемая по линии,

$$P_a = \frac{U_1 U_2}{\omega L} \sin\psi, \quad (19.12)$$

где U_1 и U_2 — напряжения на шинах приемной и передающей подстанций; ψ — угол сдвига между векторами U_1 и U_2; L — индуктивность линии; ω — угловая частота.

При включении батареи продольной компенсации с емкостью

$$P_a = \frac{U_1 U_2}{\omega L - 1/\omega C_б} \sin\psi, \quad (19.13)$$

при этом передаваемая активная мощность может быть существенно увеличена и повышен запас устойчивости параллельной работы частей энергосистемы, соединенных рассматриваемой линией электропередачи.

Степень компенсации индуктивности линии обычно ограничивается резонансными перенапряжениями на элементах линии (в том числе на батарее продольной компенсации) и обычно не превосходит 50%.

Режим работы конденсаторов в батареях продольной компенсации существенно отличается от шунтовых. Эти различия заключаются в следующем.

1. Номинальное напряжение батареи продольной компенсации определяется емкостным сопротивлением батареи $x_б = 1/\omega C_б$ и номинальным током линии $I_{ном.л}$:

$$U_{ном.б} = I_{ном.л} x_б, \quad (19.14)$$

при этом номинальное напряжение линии оказывает лишь косвенное влияние на номинальное напряжение батареи.

2. Так как ток в линии электропередачи определяется нагрузкой линии, которая не всегда соответствует номинальной, то значительную часть времени конденсаторы недогружены по напряжению, т. е. работают в облегченном режиме.

3. Конденсаторы батареи продольной компенсации подвержены большим внутренним перенапряжениям, которые возникают при коротких замыканиях, при этом кратность перенапряжений (отношение амплитудного значения перенапряжения к амплитудному значению номинального напряжения) определяется кратностью тока короткого замыкания. Эта кратность в компенсированных линиях может достигать 4—8.

В связи с этим конденсаторы рассчитываются на выдерживание перенапряжений с кратностью до 3—5; защита батарей конденсаторов от воздействия бо́льших перенапряжений осуществляется с помощью разрядников.

Схемы соединения конденсаторов в батарее выполняются по тем же принципам, что и в шунтовых батареях (см. рис. 9.10).

Принципиальная схема защиты батареи продольной компенсации от перенапряжений с помощью искрового промежутка приведена на рис. 19.13 [19.6]. В соответствии с этой схемой батарея конденсаторов разбивается на элементы C, соединяемые по мостовой схеме. Трансформатор тока TA, включенный в диагональ мостовой схемы, фиксирует протекание тока при возникновении небаланса, например при уменьшении емкости

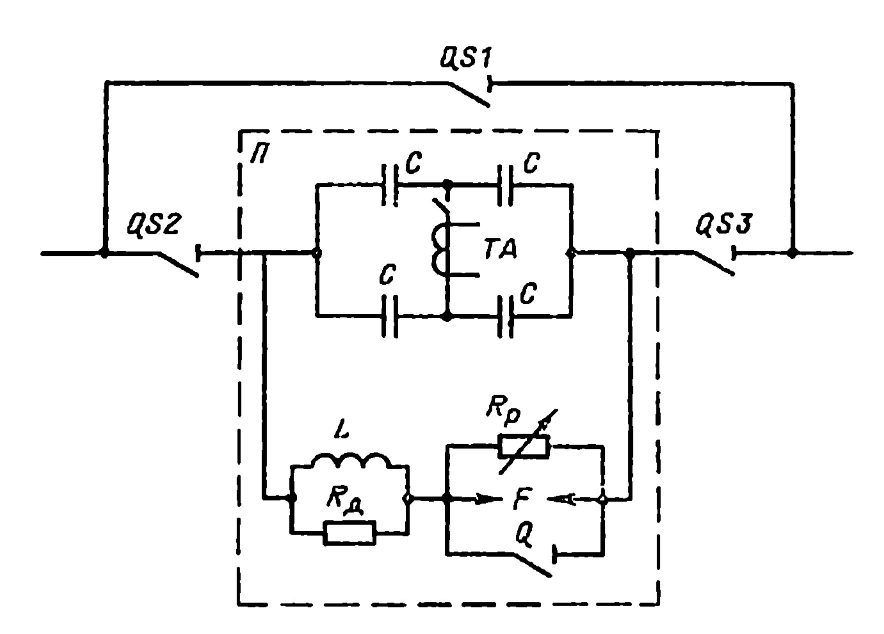


Рис. 19.13. Принципиальная схема защиты батареи продольной компенсации от перенапряжения:

C — элемент конденсаторной батареи; F — искровой защитный разрядник; $R_р$ — разрядный резистор; Q — высоковольтный выключатель; $R_д$ — демпфирующий резистор; L — демпфирующий реактор; TA — трансформатор тока; $QS1$ — $QS3$ — разъединители; $П$ — платформа, изолированная от земли

в одном из элементов мостовой схемы (в одном из конденсаторов) вследствие срабатывания большого числа предохранителей при пробоях секций. Сигнал об этой неисправности обычно подается на световое табло.

Защита батареи от перенапряжений с амплитудой, превышающей допустимое значение, осуществляется с помощью разрядника F, в качестве которого используется искровой промежуток с пробивным напряжением $U_{пр.разр}$. Вместо разрядника может быть использован нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН) на основе керамики с добавками оксида цинка. Демпфирующий резистор $R_д$ предназначен для ограничения тока и демпфирования колебаний при срабатывании разрядника. Для этого сопротивление демпфирующего резистора R выбирается из условия

$$R_д \ll \omega_1 \cdot L, \qquad (19.15)$$

где ω_1 — угловая частота колебаний, возникающих при разряде батареи конденсаторов на разрядник F; L — индуктивность демпфирующего реактора.

Демпфирующий реактор L предназначен для разгрузки резистора $R_д$ от тока короткого замыкания промышленной частоты, приводящего к появлению перенапряжений на батарее и срабатыванию разрядника. Для этого

$$R_д \gg \omega_{50} L, \qquad (19.16)$$

где $\omega_{50} = 314$ 1/с — угловая промышленная частота.

Условия (19.15) и (19.16) легко выполняются, так как $\omega_1 \gg \omega_{50}$. Разрядный резистор $R_р$ предназначен для разрядки батареи до безопасного для обслуживающего персонала напряжения на конденсаторах при ее отключении (обычно до напряжения 75 В за время не более 10 мин). Кроме того, каждый конденсатор должен быть снабжен дополнительным разрядным сопротивлением. Высоковольтный выключатель Q предназначен для гашения дуги в разряднике (выключатель включается релейной защитой сразу же после срабатывания разрядника) и последующего расшунтирования батареи после ликвидации короткого замыкания в сети.

Для батарей продольной компенсации используются те же конденсаторы, что для шунтовых батарей. Эти конденсаторы рассчитаны на воздействие перенапряжений $U_{пер.доп}$ с амплитудой не более $4{,}3\sqrt{2}\,U_{ном}$ ($U_{пер.доп} = 4{,}3U_{ном}$) для конденсаторов с $U_{ном} = 0{,}66$ кВ длительностью до 0,2 с и не более $2{,}8\sqrt{2}\,U_{ном}$ ($U_{пер.доп} = 2{,}8U_{ном}$) для конденсаторов с $U_{ном} = 1{,}05$ кВ длительностью до 1 с не более 2 раз в году. На основании допустимых перенапряжений выбирается напряжение срабатывания защитного разрядника:

$$U_{пр.разр} = (0{,}8 \div 0{,}9)\sqrt{2}\,U_{пер.доп}, \qquad (19.17)$$

где $U_{пер.доп}$ — действующее значение перенапряжения промышленной частоты, которое должно выдерживаться конденсаторами в течение заданного короткого отрезка времени.

Как указывалось выше, конденсаторы для батарей продольной компенсации снабжены плавкими предохранителями, включаемыми последовательно с каждой секцией, при этом секции в конденсаторе включены параллельно. К предохранителям предъявляются следующие требования [19.7].

1. Надежное отключение пробитой секции при амплитудном значении напряжения на конденсаторе $U_{кm}$, находящемся в диапазоне

$$0{,}5\sqrt{2}\,U_{ном} < U_к < \sqrt{2}\,U_{пер}. \qquad (19.18)$$

Принимается во внимание, что при напряжении на конденсаторе, меньшем $0{,}5\sqrt{2}\,U_{ном}$ (при малых токах нагрузки линии электропередачи), пробой секции конденсатора маловероятен.

2. Выдерживание токов, протекающих через предохранитель, включенный последовательно с неповрежденной секцией, при пробое поврежденной секции при напряжении на конденсаторе в диапазоне, указанном в (19.18), или при замыкании на малое сопротивление (коротком замыкании) на выводах конденсатора при напряжении на конденсаторе до $\sqrt{2}\,U_{пер}$.

Если $W_{пл}$ — энергия плавления плавкого предохранителя, то, предполагая в первом приближении, что при пробое секции в плавком предохранителе пробитой секции выделяется вся энергия, запасаемая в остальных неповрежденных единицах, первое условие может быть представлено в виде

$$W_{пл} \leqslant (m_c - 1)\frac{C_c(0{,}5\sqrt{2}\,U_{ном})^2}{2}, \qquad (19.19)$$

где C_c — емкость секции конденсатора; m_c — количество секций в конденсаторе, соединенных параллельно.

Аналогично второе условие имеет вид

$$W_{пл} \geqslant C_c(\sqrt{2}\,U_{пер.доп})^2/2. \qquad (19.20)$$

Из (19.19) и (19.20) можно определить минимальное количество m_c параллельно соединенных секций в конденсаторе. Приравнивая правые части неравенств (19.19) и (19.20), имеем

$$(m_c - 1)\frac{C_c(0{,}5\sqrt{2}\,U_{ном})^2}{2} = \frac{C_c(\sqrt{2}\,U_{пер.доп})^2}{2}, \qquad (19.21)$$

откуда при $m_c \gg 1$

$$m_c \approx 4(U_{пер.доп}/U_{ном})^2. \qquad (19.22)$$

Принимая $U_{пер.доп}/U_{ном} = 4{,}3$, получаем $m_c \approx 75$ шт.

19.5. ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Конденсатор является накопителем энергии, запасаемой в электрическом поле. Сравнение накопителей энергии различных типов (табл. 19.2) показывает, что даже импульсные конденсаторы, работающие при весьма высокой рабочей напряженности (порядка 200 кВ/мм), обладают значительно меньшей удельной энергией в единице объема или в единице массы, чем другие виды накопителей [1.5, 19.9, 19.10].

Таблица 19.2. **Сравнительные характеристики накопителей энергии**

Тип накопителя	Удельная энергия		Мощность в импульсе, В·А/см³ или Вт/см³
	Дж/см³	Дж/г	
Химические накопители (аккумуляторы)	500—2000	100—1000	0,3—3
Механические накопители (ударные генераторы)	10—100	1—20	$(1-10)\cdot10^2$
Индуктивные накопители	10—50	1—5	$(1-10)\cdot10^3$
Конденсаторы	0,2—10	0,1—5	$(1-5)\cdot10^5$

Однако, как следует из этой же таблицы, конденсаторы имеют значительно большую удельную мощность, т. е. могут обеспечить значительно большую скорость передачи энергии в нагрузку, при этом время передачи энергии в нагрузку может иметь значения 10^{-6} с и менее. Это объясняется весьма малым внутренним сопротивлением (малой индуктивностью) импульсных конденсаторов по сравнению с другими накопителями энергии. В связи этим конденсаторы широко используются в областях науки и техники, где необходимы быстрая передача и выделение энергии в нагрузке: в электротехнологии, в установках инерциального управляемого термоядерного синтеза, в импульсных источниках энергии для возбуждения (накачки) импульсных оптических квантовых генераторов (лазерных систем), для импульсных источников света, в медицинской технике для импульсной электротерапии нарушения ритма сердца (дефибрилляторов) и др. [19.9, 19.11]. Рассмотрим более подробно применение конденсаторов в электротехнологии.

Разрядно-импульсная технология. В этом случае используется явление возникновения высоких импульсных давлений в жидкости при ее пробое, которое называется электрогидравлическим эффектом. Принцип его состоит в следующем. В жидкость (чаще всего в воду) вводят электроды, на которые подается высокое импульсное напряжение. Процесс можно разбить на

три стадии: предпробивную, активную и пассивную. Предпробивная начинается с момента подачи напряжения на электроды, заканчивается пробоем жидкости и возникновения в ней нитевидного канала разряда. В следующей, активной, стадии канал разряда превращается в плазменный канал высокой проводимости. Вследствие быстрого (за время единиц или десятков микросекунд) выделения большого количества энергии (10^3-10^5 Дж) плазма в канале нагревается до температуры $(10-40)\cdot10^3$ К; одновременно происходит расширение канала со скоростью порядка $(2-10)\cdot10^2$ м/с, в результате чего возникает интенсивное гидродинамическое возмущение, имеющее характер волны сжатия и распространяющееся со скоростью $(1{,}5-3{,}0)\cdot10^3$ м/с, близкой к скорости звука в данной жидкости. Эта волна сжатия используется в технологическом цикле.

Канальная, или активная, стадия заканчивается с прекращением протекания тока в разрядной цепи, после чего начинается пассивная стадия, в которой канал разряда переходит в парогазовую полость.

Давление вблизи канала разряда в жидкости можно оценить по формуле [19.12]

$$P_ж=\gamma_ж a^2/\tau^2, \qquad (19.23)$$

где $a=[(\beta-1)\tau^2 W/(\pi\gamma_ж l_р)]^{1/4}$; W — энергия, вводимая в канал разряда; $\gamma_ж$ — плотность жидкости; τ — длительность разряда; $l_р$ — длина разрядного промежутка; β — эффективный показатель адиабаты плазмы конденсированного разряда: $\beta\approx1{,}26$.

Это давление может достигать значений порядка 10^3-10^4 МПа. Электрогидравлический эффект широко используется в установках для разрушения, дробления и измельчения минералов и других веществ, листовой штамповки, очистки отливок, прессования порошков, кристализации веществ из растворов и др. С помощью электрогидравлического эффекта может производиться переработка или разрушение непроводящих твердых сред, и он более экономичен по сравнению с другими способами. Например, разрушение объема 1—1,5 м^3 с помощью электрогидравлического эффекта обходится в 10 раз дешевле разрушения его с помощью взрывчатых веществ.

Магнитно-импульсная технология. Существо этого процесса состоит в том, что при разряде конденсаторной батареи на соленоид (индуктор) в нем создается магнитное поле, которое вызывает появление вихревых токов большой силы в обрабатываемой заготовке. Магнитное поле вихревых токов, взаимодействуя с магнитным полем индуктора, создает механические усилия, производящие пластическую деформацию заготовки.

Сила, действующая нормально к поверхности проводника в точке S и отнесенная к единице поверхности, равна:

$$F_{уд}(S)=B^2(S)/2\mu_0=W_{уд}(S), \tag{19.24}$$

где $B(S)$ — магнитная индукция в точке S; μ_0 — магнитная постоянная; $W_{уд}$ — удельная энергия магнитного поля.

Для необходимого изменения конфигурации поля в рабочем объеме применительно к требуемой технологической операции применяются одновитковые вкладыши (концентраторы магнитного потока). С помощью магнитно-импульсной обработки металлов можно штамповать изделия различной формы, обжимать изделия (например, трубы), насаживать одну трубу на другую с высокой прочностью и плотностью соединения, соединять (впрессовывать) трубу в стенки коллектора и др.

В настоящее время в разрушающих соленоидах могут быть получены поля с индукцией около 300—500 Тл, приводящие к удельному давлению на поверхность металла до 10^5 МПа, что намного превосходит механические прочностные характеристики (например, предел текучести) металлов.

19.6. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ ПО НЕКОТОРЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ ТИПАМ СИЛОВЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Приведенные в [19.2] справочные данные по силовым конденсаторам, за исключением ряда типов, относятся к пропитке трихлордифенилом, применение которого ввиду его экологической опасности в настоящее время запрещено, и он заменен экологически безопасными пропитывающими жидкостями. Данные о конденсаторах с пропиткой такими жидкостями в литературе отсутствуют, и поэтому ниже, в дополнение к [19.2], приводятся номинальные данные некоторых типов конденсаторов. Климатические исполнения, условия и режимы эксплуатации, расстояния между конденсаторами в батареях, ресурсы и т. д. остались практически такими же, какие указаны в [19.2].

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электроустановок переменного тока промышленной частоты

Полное обозначение конденсатора имеет вид КЭКХ-U-Q-YZ, которое расшифровывается следующим образом: К — косинусный (для повышения коэффициента мощности); Э — экологически безопасный; К — с комбинированным (бумажно-пленочным) диэлектриком; Х — назначение конденсатора: Ф — фильтровой; Ш — шунтовой (для батарей параллельного включения); U — номинальное напряжение, кВ; Q — номинальная

реактивная мощность, квар; Y — число изолированных от корпуса выводов (1, 2 или 3); Z — климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69. При заказе указывается полное обозначение конденсатора, в которое вместо символов X, U, Q, Y, Z представляются их значения из табл. 19.2.

Таблица 19.2. Конденсаторы для повышения коэффициента мощности установок промышленной частоты

Тип	U, кв	Z	f, Гц	C, мкФ	I, А	Размеры корпуса, мм
		$Q=150$ квар				
КЭКФ	4,4	У1, ХЛ1 Т2, Т3	50	24,7	34	380 × 120 × 640 (здесь и далее последний размер — высота)
		Т2, Т3	60	20,6		
	6,6	У1, ХЛ1, Т2, Т3	50	11,0	23	
		Т2, Т3	60	9,1		
	7,3	У1, ХЛ1, Т2, Т3	50	9,0	20	
		Т2, Т3	60	7,5		
		$Q=200$ квар				
	4,0	УХЛ1, Т2 Т3	50	39,3	50	380 × 135 × 640
		Т2, Т3	60	33,2		
	4,4	УХЛ1, Т2, Т3	50	32,9	45,5	380 × 120 × 640
		Т2, Т3	60	27,4		
	6,3	УХЛ1	50	16	32	
	6,6	УХЛ1, Т2 Т3	50	14,6	30	
		Т2, Т3	60	12,2		

Тип	U, кВ	Z	f, Гц	C, мкФ	I, А	Размеры корпуса, мм
КЭКФ	7,3	УХЛ1, Т2, Т3	50	12	23	380 × 120 × 640
		Т2, Т3	60	10		
КЭКШ	6,3	У1	50	16	32	380 × 135 × 640
(Y = 1)	7,3			12	21	
КЭК-6,3-150У*	6,3	У1	50	12	16	430 × 120 × 821

* Реактивная мощность конденсатора 150 квар.

Конденсаторные блоки для комплектования конденсаторных батарей

Блок конденсаторный БКЭ-1,05-252У1. Предназначен для комплектования батарей параллельного включения (шунтовых) линий электропередачи напряжением 6, 10, 35 и 110 кВ. БК — блок конденсаторный; Э — экологически безопасный; номинальные данные: напряжение — 1,05 кВ; реактивная мощность — 252 квар; емкость — 728 мкФ; ток — 240 А; климатическое исполнение — У1. Размеры корпуса 575 × 530 × 900 мм.

Конденсаторы для электроподвижного состава и тяговых подстанций

Конденсатор КЭК-0,5-38У2 для электроподвижного состава. К — косинусный; Э — экологически безопасный; К — комбинированный (бумажно-пленочный) диэлектрик; 0,5 — номинальное напряжение, кВ; 38 — реактивная мощность, квар; У2 — климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69. Размеры корпуса 380 × 120 × 640 мм.

Конденсатор ФЭТ-4-16У2 для тяговых подстанций. Ф — фильтровый; Э — экологически безопасный; Т — для тяговых подстанций; 4 — номинальное напряжение, кВ; 16 — номинальная емкость, мкФ; У2 — см. выше. Конденсатор допускает работу с наложением переменной составляющей с частотой от 100 до 1600 Гц ± 2,5% в зависимости от отношения действительного значения переменной и емкости конденсатора по ниже приведенным данным (не более):

f, Гц	200	300	400	500	600	900	1200	1400	1600
$U_{\sim}$, кВ ...	0,680	0,630	0,457	0,408	0,372	0,306	0,265	0,223	0,209
$I_{уд}$, А/мкФ	0,58	0,82	1,00	1,28	1,42	1,73	2,00	2,00	2,1

Размеры корпуса 380×120×325 мм.

Конденсаторы для полупроводниковых преобразователей частоты

Конденсатор ПСП-6-5У3. П — для полупроводниковых преобразователей; С — синтетическая экологически безопасная пропитка; П — пленочный диэлектрик; 6 — номинальное напряжение или амплитуда импульса, кВ; 5 — номинальная емкость, мкФ; У3 — климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69. Номинальная частота — 0,57 кГц. Размеры корпуса 380×120×325×120×325 мм.

Конденсатор ФСК-6-140У3. Ф — фильтровый; С — синтетическая пропитка; К — комбинированный (бумажно-пленочный) диэлектрик; 6 — номинальное напряжение, кВ, состоящее из постоянной составляющей 5,9 кВ и переменной составляющей с действующим значением 0,1 кВ; 140 — емкость, мкФ; У3 — климатическое исполнение. Номинальная частота — 10 кГц. Размеры корпуса 380×120×350 мм.

Импульсные конденсаторы типа ИК

Полное обозначение конденсатора ИКХ-U-CZ, в котором И — импульсный; К — пропитка касторовым маслом; Х — цифра, обозначающая конструктивную особенность; U — номинальное напряжение, кВ; С — номинальная емкость, мкФ; Z — климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69. При заказе указывается полное обозначение конденсатора с заменой в нем символов X, U, C и Z их значениями, приведенными в табл. 19.3 и 19.4.

Конденсатор ИК-3-300У3. Предназначен для работы в цепях питания электрофизических установок. Номинальное напряжение — 3 кВ; номинальная емкость — 300 мкФ. Размеры корпуса 380×120×640 мм.

Конденсаторы для повышения коэффициента мощности электротермических установок повышенных частот (рис. 19.5)

Общее обозначение конденсаторов ЭЭВК-U-f-Z, в котором Э — электротермический (для электротермических установок); Э — экологически безопасный; В — водяное охлаждение; К — комбинированный (бумажно-пленочный) диэлектрик; U — номинальное напряжение, кВ; f — номинальная частота, кГц; Z — климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69. Все конденсаторы данной серии имеют климатическое исполнение У1 и выпускаются в корпусах размером 380×120×350 мм.

Таблица 19.3. **Импульсные конденсаторы**

Тип конденсатора	U, кВ	C, мкФ	Z	L, нГн	Размеры корпуса, мм
*Амплитуда импульса тока до 40 кА**					
ИК-6-150	6	150	УХЛ4	60	310×150×590
ИК-8-85	8	85			
ИК-10-50	10	50			
*Амплитуда импульса тока до 200 кА***					
ИК-25-13,2	25	13,2	УХЛ4	35	314×320×668
ИК-30-9,2	30	9,2			
ИК-50-3,3	50	3,3			
ИК-60-2,3	60	2,3			

* Частота следования импульсов не более одного в 2 мин; при колебательном разряде декремент не менее 2; L - номинальная индуктивность конденсатора.
** Частота следования импульсов не более 3 $мин^{-1}$; декремент не менее 1,5.

Таблица 19.4. **Импульсные конденсаторы новых типов, выпускаемые малыми сериями [19.13]**

Тип конденсатора	C, мкФ	M, кг	U, кВ	L, нГн	Габариты, мм	Ресурс циклов	Удельная энергия, Дж/г
ИК-10-60	60	10	10	100	160×160×300	$2\cdot10^3$	0,3
ИКМ-50-9	9	55	50	30	314×314×335	10^4	0,2
ИКМ1-50-12	12	55	50	20	314×314×335	$5\cdot10^3$	0,26
ИКМ-50-6	6	110	50	20	314×314×670	$2\cdot10^4$	0,07
ИКМ-50-9	9	110	50	20	314×314×670	$2\cdot10^4$	0,1
ИКМ-50-12	12	110	50	20	314×314×670	$2\cdot10^4$	0,13
ИКМ-50-20	20	110	50	20	314×314×670	10^4	0,22
ИК-100-0,8	0,8	29	100	180	455×150×326	$2\cdot10^4$	0,13
ИК-100-1,2	1,2	30	100	180	455×150×326	$2\cdot10^4$	0,2
ИК-100-1,8	1,8	30	100	180	455×150×326	$(1,5-6)\cdot10^3$	0,3
ИК-100-2,4	2,4	30	100	180	455×150×326	$1\cdot10^3$	0,4

Примечание. Режим работы: апериодический разряд, частота повторения импульсов до 1—2 Гц. В случае необходимости повышения ресурса конденсатора или его работы в колебательном режиме рабочее напряжение должно быть снижено на значение, согласованное с разработчиком. Конденсаторы на 10 и 50 кВ выпускаются в металлическом корпусе, на 100 кВ — в пластмассовом корпусе. Климатическое исполнение — УХЛ4.

Таблица 19.5. **Конденсаторы ЭЭВК**

U, кВ	f=0,5 кГц		f=1 кГц		f=2,4 кГц		f=4 кГц		f=10 кГц	
	C, мкФ	I, А	C, мкФ	I, А	C, мкФ	I, А	C, мкФ	I, А	C, мкФ	I, А
0,5	—	—	—	—	146	1100	87,58	1100	41	1300
0,8	149,3	375	112	563	57	688	34,21	688	16,17	813
1,0	95,5	300	71	450	36	550	21,89	550	—	—
1,6	37,3	188	28	281	14	344	8,55	344	—	—
2,0	23,9	150	17	225	9,1	275	5,47	275	—	—
Q, квар	300		450		550		550		650	

ПРИЛОЖЕНИЕ

Ниже приводятся некоторые математические дополнения, поясняющие и расширяющие основной текст. Строгие аналитические решения некоторых задач (искажение поля токоотводом, уравнения для построения картины поля при сдвиге обкладок) получены впервые.

Интеграл Кристоффеля — Шварца. Поле в конденсаторном диэлектрике, имеющее форму многоугольника с границей в виде составленной из отрезков прямых ломаной линии, является плоскопараллельным (двумерным) и конформные преобразования его наиболее просто и удобно выполняются с помощью интеграла Кристоффеля — Шварца. Отображающая функция является аналитической функцией комплексного переменного, удовлетворяющей условиям Коши — Римана. Производная отображающей функции $f(z)$, которую для краткости будем обозначать также z, связана с параметрами геометрии поля соотношением

$$(dz/dt)=[df(z)/dt]=C\prod_{1}^{n}(t-a_i)^{\alpha_i-1}=C\prod_{1}^{n}(t-a_i)^{-\mu_i},$$

где Π — символ произведения; C — постоянная, определяемая из условий задачи; a_i — координаты вершин многоугольника на действительной оси ξ плоскости t, расположенные в той же последовательности, в которой они встречались при обходе многоугольника по его контуру; α_i — внутренний угол i-й вершины, выраженный в долях π; $\mu_i=1-\alpha_i$ — угол в долях π, дополняющий угол α_i до 1.

Интегрируя его, получим отображающую функцию

$$z=f(z)=C\int\prod_{1}^{n}(t-a_i)^{-\mu_i}dt+C_1,$$

где C_1 — постоянная интегрирования, определяемая, как и C, из условий задачи.

При конформных отображениях изменяются конфигурация и линейные размеры обкладок, плотности зарядов на них, напряженности поля, но остаются неизменными потенциалы обкладок, суммарные заряды на них или соответствующих их частях, собственные и взаимные емкости обкладок и общая запасаемая полем потенциальная энергия.

Модуль приращения $|\Delta z|$ есть расстояние между точками z и $z+\Delta z$ в плоскости z, а модуль $|\Delta t|$ — расстояние между точками t и $t+\Delta t$ в плоскости t. Модуль отношения $|\Delta t/\Delta z|$ показывает, во сколько раз изменяется расстояние между соответствующими точками при отображении в плоскость t с помощью функции $f(z)$ области, заданной в плоскости z. Он называется модулем коэффициента преобразования и является функцией координат точки. При конформном отображении электрического поля он представляет коэффициент искажения поля. В общем случае коэффициент преобразования, как и коэффициент искажения, является величиной комплексной.

Ширина зоны искажения поля. Используя формулу (2.13), определяем, на каком расстоянии x от края обкладки значение E_t отличается от E_0 не более чем на β (в процентах). Для решения задачи нужно при заданном v найти значение u, удовлетворяющее уравнению

$$\sqrt{1+2\exp(2\pi u/d)\cos(2\pi v/d)+\exp(4\pi u/d)}=1-(\beta/100). \qquad (\text{П.1})$$

Приближенное решение его при $\beta\leqslant 10\%$ и пренебрежения β^2 имеет вид

$$\exp(2\pi u/d)\approx\cos(2\pi v/d)\pm\sqrt{\cos(2\pi v/d)-2\beta}. \qquad (\text{П.2})$$

Для $v=(29/30)(d/2)$ и $\beta=1\%$ значения $\exp(2\pi u/d)$ равны 0,01 и 1,98 и теперь $u=-4{,}6d/2\pi$ и $u=0{,}683d/2\pi$. Из (2.12а) имеем $x=u-\exp(2\pi u/d)$, откуда $x=-4{,}610d/2\pi$ и $x=-1{,}297d/2\pi$. Одно значение соответствует внутренним, другое — наружным частям секции. Край обкладки имеет абсциссу $x=-d/2\pi$ и абсолютные значения расстояния от него до заданной точки составляют: внутри секции $x_1=2{,}610d/2\pi$ и снаружи $x_2=0{,}297d/2\pi$.

Уравнения для построения картины поля при сдвиге обкладок. В соответствии с данными рис. 2.4 производная первой (из плоскости z в плоскость t) отображающей функции имеет вид

$$(dz/dt)=C\left[t-(a-1)-a/t\right]. \qquad (\text{П.3})$$

Постоянная C определяется подстановкой в (П.3) $t=\rho e^{i\varphi}$ и интегрированием его по φ в пределах от $\varphi=0$ до $\varphi=\pi$ по окружности бесконечно малого радиуса, проведенной вокруг точки $t=0$, которой в плоскости z соответствует точка $z=id$, и $C=-d/\pi a$. После подстановки ее в (П.3) и интегрирования получим

$$z=(d/\pi a)\left[(t^2/2)-(a-1)t-a\ln t\right]. \qquad (\text{П.4})$$

Подставляя в (П.3) $t=-1$, чему в плоскости z соответствует $z=b+id$, выбирая $b=-d(2a-1)/2\pi a$, получаем, что постоянная интегрирования $C_1=0$. Значению $t=a$ соответствует $z=\lambda d-b$. Подставляя их в (П.3) и преобразуя, получаем формулу (2.20). Вторая отображающая функция (из плоскости t в плоскость w) имеет вид

$$w=(d/\pi)\ln t. \qquad (\text{П.5})$$

Используя (2.9), (П.4) и (П.5), получаем формулу (2.24). Выражая далее t через w из (П.5), заменяя $w=u+iv$ и подставляя в (П.4), после преобразований получаем уравнения для построения картины поля

$$x = u + [(a-1)/a](d/\pi)\exp(\pi u/d)\cos(\pi v/d) -$$
$$-(d/\pi a)\exp(2\pi u/d)\cos(2\pi v/d); \qquad (П.6а)$$
$$y = v + [(a-1)/a](d/\pi)\exp(\pi u/d)\sin(\pi v/d) -$$
$$-(d/\pi a)\exp(2\pi u/d)\sin(2\pi v/d). \qquad (П.6б)$$

Используя полученные формулы, можно определить тангенс угла наклона $\operatorname{tg}\beta$ (см. с. 32) — вектора напряженности в любой точке поля. Рассмотрим его поведение при изменении a на примере точки B. При $a=1$ (отсутствие сдвига) $\beta=\pi/2$, т. е. вектор напряженности перпендикулярен оси x. С увеличением a наклон его будет меняться, достигая предельного значения при $a=\infty$. Практически предельное значение достигается при $a=100$, чему соответствует $\lambda=17{,}4d$.

Искажение поля токоотводом. В соответствии с данными рис. 2.6 производная первой отображающей функции имеет вид

$$(dz/dt) = (C/t)\sqrt{(t-1)(t-a)}. \qquad (П.7)$$

Постоянные a и C находятся подстановкой в (П.7) $t=\rho e^{i\varphi}$ и интегрированием по φ по окружностям, проведенным вокруг точки $t=0$ в пределах от 0 до π. Окружность при определении C имеет бесконечно большой радиус, чему в плоскости z соответствует $z=id$, при определении a — бесконечно малый, чему соответствует $z=i(d-d_т)$, где $d_т$ — толщина токоотвода. В результате получим $C=d/\pi$ и $a=d/(d-d_т)$. Интегрирование (П.7) даст

$$z=(d/\pi)\operatorname{arch}[(2t-a-1)/(a-1)] - (1/\sqrt{a}\operatorname{arch}[(a+1)t-(2a)]/(a-1)\}. \qquad (П.8)$$

Постоянная интегрирования $C_1=0$, что проверяется подстановкой в (П.8) $t=+1$, чему соответствует $z=id_{Т}$. Аналогично находится и вторая отображающая функция

$$w=(d/\pi)\ln t. \qquad (П.9)$$

Из (П.8), (П.9) и (2.9) следует формула (2.24).

Выражая из (П.9) t через w и заменяя $w=u+iv$, после подстановки его в (П.8) получаем

$$z=(d/\pi)[\operatorname{arch}(P_1+iQ_1)-(1/\sqrt{a})\operatorname{arch}(P_2+iQ_2)], \qquad (П.10)$$

в котором P_1, P_2, Q_1, Q_2 есть действительные величины, являющиеся функциями u, v, d, $d_{Т}$. Заменяя в (П.10) $z=x+iy$ и используя соотношение

$$\operatorname{arch}(P+iQ)=\operatorname{arch}[\sqrt{(1+P)^2+Q^2}+\sqrt{(1-P)^2+Q^2}]/2+$$
$$+i\arccos[\sqrt{(1+P)^2+Q^2}-\sqrt{(1-P)^2+Q^2}/2,$$

получаем уравнения для построения картины поля

$$x=(d/\pi)\{[\operatorname{arch}(\sqrt{A}+\sqrt{B})/(a-1)]-(1/\sqrt{a})\times$$
$$\times\operatorname{arch}[a(\sqrt{C}+\sqrt{D})/(a-1)]\}; \qquad (П.11а)$$

$$y=(d/\pi)\{\arccos[(\sqrt{A}-\sqrt{B})/(a-1)]-(1/\sqrt{a})\times$$
$$\times\arccos[a(\sqrt{C}-\sqrt{D})/(a-1)]\}, \qquad (\text{П.116})$$

в которых

$$A=[\exp(\pi u/d)-\cos(\pi v/d)]^2+\sin^2(\pi v/d);$$
$$B=[\exp(\pi u/d)-a\sin(\pi v/d)]^2+a^2\sin^2(\pi v/d);$$
$$C=[\exp(-\pi u/d)-\cos(\pi v/d)]^2+\sin^2(\pi v/d);$$
$$D=[\exp(-\pi u/d)-(1/a)\cos(\pi v/d)]^2+(1/a)^2\sin^2(\pi v/d).$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. **Силовые электрические конденсаторы**/Г. С. Кучинский, Н. И. Назаров, Г. Т. Назарова, И. Ф. Переселенцев. М.: Энергия, 1975.

1.2. **Ренне В. Т.** Электрические конденсаторы. Л.: Энергия, 1969.

1.3. **Ренне В. Т.** Пленочные конденсаторы с органическим диэлектриком. Л.: Энергия, 1971.

1.4. **Ренне В. Т., Багалей Ю. В., Фридберг И. Д.** Расчет и конструирование конденсаторов. Киев: Техника, 1966.

1.5. **Кучинский Г. С.** Высоковольтные импульсные конденсаторы. Л.: Энергия, 1973.

1.6. **Мантров М. И.** Расчет бумажно-масляных конденсаторов для силовых установок. М.: МЭИ, 1960.

1.7. **Торощин П. А.** Металлобумажные конденсаторы. М.-Л.: Энергия, 1965.

1.8. **Яманова Л. В.** Силовые электрические конденсаторы. М.: ВЗЭИ, 1964.

1.9. **Liebscher F., Held W.** Kondensatoren. Springer—Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1968.

1.10. **Гулевич А. И., Киреев А. П.** Производство силовых конденсаторов. М.: Высшая школа, 1981.

1.11. **Imhof A.** 235 Jahre elektrischen Kondensatoren. Ein Ruckblick.//Bull. d. schweizer. elektrotechn. Vereines, 1980. Bd 71, № 23. S. 1253.

1.12. **А. с. 445933 СССР.** Конденсатор/В. А. Акопян, Ю. С. Чатинян//Открытия. Изобретения. 1974. № 37.

1.13. **Пат. 110719 от 5.01.75 ГДР.** Impragnierter selbst-heilender elektrischer Kondensator/E. Hirsch.

2.1. **Fox M., Plessner K. W., Hall M. M.** Theory of discharges at the foil edge in capacitor//Proc. IEEE. 1968. Vol. 115, № 7. P. 1027.

2.2. **Титов М. Н.** К расчету электрического поля на краю плоского конденсатора с учетом конечной толщины обкладки//Электричество. 1980. № 8. С. 64.

2.3. **Титов М. Н., Багалей Ю. В.** Электрическое поле на краю секции импульсного конденсатора с учетом конечного сдвига обкладок//Изв. вузов. Энергетика. 1977. № 9. С. 31.

2.4. **Титов М. Н.** Расчет электрического поля на краю секции конденсатора//Электричество. 1979. № 11. С. 56.

2.5. **Набока Б. Г.** Электрическое поле на краю обкладки конденсатора при нелинейной конфигурации границ раздела сред//Электричество. 1978. № 2. С. 72.

2.6. **Конотоп В. В., Рудаков В. В.** Расчет электрического поля вдоль поверхности раздела диэлектриков у края электрода//Электричество. 1978. № 7. С. 66.

2.7. **Кононов А. П.** Расчет емкости плоского конденсатора с учетом краевого эффекта//Изв. вузов. Электромеханика. 1966. № 3. С. 239.

2.8. **Назаров Н. И.** Об электрическом поле в силовом конденсаторе//Тезисы докладов к V Всесоюз. научн.-техн. совещанию «Повышение качества и улуч-

шение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок» (Серпухов, март 1983 г.) М.: Информстандартэлектро. 1983. С. 53.

2.9. **Heywang H., Preissinger H.** Verteilung des elektrischen Feldes in Kondensatoren mit metallisierten Dielektrika//Frequenz. Bd 69. 1965. № 7. S. 242.

2.10. **Кирьяков А. Н., Попова В. А., Шнеерсон Г. А.** Расчет напряженности поля вблизи кромки диэлектрика в неоднородном поле.//Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1978. № 5. С. 108.

2.11. **Титов М. Н.** Электрическое поле под обкладками импульсного конденсатора со вставным выводом//Новое в разрядно-импульсной технологии. Киев: Наукова думка. 1979. С. 51—56.

2.12. **Резвых К. А.** Расчет электростатических полей. М.: Энергия, 1967.

3.1. **Оболончик И. Б., Багалей Ю. В., Чернова В. А.** Основные характеристики абсорбционных свойств конденсаторов//Вестник ХПИ, 1971. В. 1. № 5. С. 79--83.

3.2. **Оболончик И. Б., Багалей Ю. В.** Оценка коэффициентов абсорбции конденсаторов с неоднородным диэлектриком//Там же. С. 31.

3.3. **Расчет** эксплуатационных характеристик и применение электрических конденсаторов/Б. П. Беленький, П. Н. Бондаренко, М. Э. Борисова и др. М.: Радио и связь, 1988.

3.4. **Релаксационные** свойства конденсаторов с органическим диэлектриком/И. Б. Оболончик, С. Ф. Старусева и др.//Вестник ХПИ им. В. И. Ленина. Сер. Электроэнергетика и автоматизация электроустановок, 1982, № 193, вып. 10, с. 59—61.

4.1. **Теория** диэлектриков/Н. П. Богородицкий, Ю. М. Волокобинский, А. А. Воробьев, Б. М. Тареев. М.—Л.: Энергия, 1965.

5.1. **Назаров Н. И.** Некоторые свойства материалов силового конденсаторостроения//Семнадцатая научно-технич. конф. МИРЭА. Тезисы докладов. М.: МИРЭА. 1967. С. 141.

5.2. **Вайсман Л. М.** Конденсаторная бумага. М.: Лесная пром-сть, 1985.

5.3. **Каталог** фирмы «Тервакоски» (Финляндия).

5.4. **А. с. 565970 СССР.** Состав для изготовления изоляционной бумаги/Эфрос М. Д. и др.

5.5. **Power capacitors** with mixed paper and polypropylene dielektric/Zanobetti D., Gertsch G. A., Hopkins R. I., Rabanit T. A., Wentzel K.//CIGRE. 1970. Rep. 15-04.

5.6. **Eustance J. W., Solberg W. O.** Polypropylene film improves power capacitors//Insulation (Circuit), 1970. № 5. P. 43.

6.1. **Назаров Н. И.** Некоторые свойства пропитывающих диэлектриков для силовых конденсаторов//Электротехника. 1971. № 4. С. 57.

6.2. **Назаров Н. И., Калашникова О. А.** Температурные характеристики пропитывающих диэлектриков для силовых конденсаторов//Изв. вузов. Энергетика. 1971. № 8. С. 12.

6.3. **Scarfe E. C. R., Pulsford R. G.** Relationship between power factor and resistivity of oil and the power factor of impregnated paper//Proc. IEEE. 1965. Vol. 117, № 3.

6.4. **Olivier Ch.** Die dielektrische Festigkeit von flüssigen Isolierstoffe//Bull. SEV/VSE, 1983. Bd 74, № 3.

6.5. **Preissinger H.** Durchschlagfeldstärke von Isolier-Ölen in Abhangigkeit von der Schichtdicke//ETZ-A. 1970. № 2. S. 118.

6.6. **Newcomb G. R., Stenger R. A.** The non PCB power capacitor environmental compatibility and capacitor performance//American power conf. Chicago. 1977, April.

6.7. **Reynolds E. H.** Ascarels-a call for objectivity//El. Times, 1976, October, № 22. P. 12.

6.8. **Madama G.** Kleiner ohne PCB. Kondensatorenentwicklung nach Verzicht auf PCB//Elektrotechnik, BRD. 1981. Bd 63. № 5. S. 38.

6.9. **Interaction** between diarylalcane and polypropylene film in capacitors/Massunga M., Kohno J., Hasegava H., Machido H./Nippon Oil Co.,

Ltd.); Sabo A., Shumitzu J. (Nippon petroleum chemicals Co., Ltd.); Iseki S., Sagarifuji K. (Toray Industries Inc.) // Доклад на Всемирном электротехническом конгрессе. М.: июнь 1977.

6.10. **Nacamura H.** Characteristics of Nisseiki Condenser Oil S and film-type capacitor impegnated with Nisseki Condenser Oil S // CIGRE, WG-15-02, Budapest Meeting, 1975.

6.11. **Lapp J.** A new dielectric fluid for power capacitors // Pensylvania El. Assotiat. Meeting, Pittsburg, Oct. 1976.

6.12. **Mercier G. E.** Wemcol capacitors fluid development // American power conf. Chicago, April 1977.

6.13. **Jay P.** Benzylneocaprate. A non chlorinated dielectric fluid for high voltage capacitors // CIGRE, WG-15-05, Rep. 16, Rome Meeting, November 1977.

6.14 **A contribution** to the evaluation of various impregnated fluids for power capacitors / Cesari S., Serena E., Sesta E. (ENEL); Zanobetty D. (Univ. of Bologna); Madama G., Marconcini M., Stanghellini C. (ANEL) // CIGRE, Rep. 15-08, sess. 1980.

6.15. **Назаров Н. И.** Оценка внутреннего поля в конденсаторном диэлектрике // Электротехническая промышленность. Сер. АВН, трансформаторы, силовые конденсаторы. М.: Информэлектро, 1978, № 4 (84), с. 9.

7.1. **Пат. 4228481 США.** Capacitor with embassed foil elektrode / Di Nocola N. G., Plastir R. U., Wright R. J. (GEC).

7.2. **Чатинян Ю. С., Сараджев В. А., Кургинян Э. В.** //

а. Электрические характеристики явления самовосстановления конденсаторов с металлизированными обкладками, 1979. № 5. С. 222—229.

б. Расчет параметров разрядного контура при самовосстановлении конденсаторов с металлизированными обкладками, 1979, № 5 С. 222—229.

в. Исследование мощности разрядного процесса при пробое самовосстанавливающихся конденсаторов с металлизированными обкладками, 1979, № 5. С. 17—222 // Научные труды Ереванского политехнического ин-та, Ереван.

7.3. **Baumann M.** Selbstheileffekt in metallisierten Kunststoffkondensatoren // Bauelementen der Elektrotechn. 1977. Bd 12, № 3. S. 42.

7.4. **Заявка № 2648516 от 3.05.78 ФРГ.** Verfahren zur Herstellung einer Aufdampfschicht / K. Kerner, G. Mutschler, E. Zehender.

7.5. **Пат. 4089037 от 9.05.78 США.** Pleated metallised film capacitor / Ch. Rayburn.

7.6. **Заявка 2730038 от 11.06.78 ФРГ.** Selbstheilender elektrischer Kondensator / H. Forster.

7.7. **Заявка 2757104 от 5.07.79 ФРГ.** Verfahren zur Herstellung eines regenerierfahigen elektrischen Kondensators / Heywang H., Heyler G., Kaufmann K., Kotschy J.

7.8. **Пат. 1589897 от 6.04.78 ФРГ.** Mit einem Zusatz-Dielektrikum getrankter regenerierfahiger Kondensator / Seiff M.

8.1. **Назаров Н. И.** Работа бумажно-масляной конденсаторной изоляции при несинусоидальном напряжении // IX научно-техническая конференция ВЗЭИ (Тезисы докладов). М.: ВЗЭИ, 1959. С. 43—45.

8.2. **Назаров Н. И., Переселенцев И. Ф.** Влияние коэффициента запрессовки на электрические характеристики бумажно-масляного диэлектрика // Вестник электропромышленности. 1960. № 6. С. 55—60.

8.3. **The development** of dielectric all-film capacitors and the evaluation of their endurance / J. Samat (Alstom), J. J. Courtet (Bollore Technoloques), G. Bernard (Electr. de France), P. Jey (Prodelec), P. Bernard (Rectiphase), (France) // CIGRE, rep. 15-06, sess. 27.08—4.09.86.

9.1. **Partial** discharge measurements. IEC-publicat. 270, 1981.

9.2. **ГОСТ 20074-83 (СТ СЭВ 3689-82).** Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения характеристик частичных разрядов.

9.3. **Кучинский Г. С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. Л.: Энергия, 1979.

9.4. **Partial** discharge and service life of capacitor insulation / G. S. Kutchinsky, Y. S. Pintal с. а. // CIGRE, 1966, Rep. 137.

9.5. **Герцик А. К.** Ионизационные характеристики бумажно-масляной конденсаторной изоляции при искаженной форме воздействующего напряжения//Изв. НИИПТ. 1953. Вып. 3. С. 66—88.

9.6. **Пинталь Ю. С.** Ионизационные характеристики и старение бумажно-масляной изоляции//Электротехника. 1965. № 1. С. 58.

9.7. **Church H. F.** Partial discharges phenomena in power capacitors//CIGRE, Study Committee № 15, Working Group 15 «Capacitors», 1970.

9.8. **Бондаренко П. Н., Койков С. Н., Самсонов Е. А.** Зависимость напряженности возникновения частичных разрядов конденсаторного диэлектрика от электрической прочности пропитывающей жидкости в тонких слоях//Электротехническая промышленность. Сер. АВН, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1982. № 7 (129). С. 5—7.

9.9. **Карабанов В. И., Беленький Б. П.** Применение комбинированного диэлектрика в современных высоковольтных конденсаторах//Тезисы докладов к V Всесоюзному совещанию «Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок». Серпухов, 1983. М.: Информэлектро. 1983. С. 16—17.

9.10. **Набока Б. Г., Оболончик И. Б.** Оптимизация структуры поля конденсаторов//Тезисы докладов к всесоюзному научно-техническому совещанию «Состояние и перспективы развития электрической изоляции» (г. Киев). Л.: НТОЭиЭП. 1980. С. 82—87.

9.11. **Исследование начальных частичных разрядов в конденсаторной изоляции фотоэлектрическим и электронно-оптическим методами**/Е. П. Воронков, А. В. Иванов, А. К. Лоханин и др.//Тезисы докладов к всесоюзному совещанию «Состояние и перспективы развития электрической изоляции» (г. Свердловск). Л.: НТОЭиЭП. 1987. С. 37—38.

9.12. **Curtis G. A.** Impregnated plastic film power capacitors//The BEAMA El. Ins. Conf., Sess. 4, Pow. Cap., pap. 4a, 1970.

9.13 **Галахова Л. Н.** Косинусные высоковольтные конденсаторы с чистопленочным диэлектриком и пропиткой экологически безопасными жидкостями//Электротехническая промышленность. Сер. Силовые конденсаторы. Обзор. М.: Информэлектро. 1988. Вып. 4. С. 28.

9.14. **Венцель К.** Новая технология изготовления силовых конденсаторов. Доклад на выставке «Современная промышленная техника в Австрии» (фирма Kasch). М.: 1986, С. 47.

9.15. **Современное состояние в области самовосстанавливающихся конденсаторов в Японии**/Яшида, Яманака, Матсунага и др.//Электроизоляционные материалы (СИГРЭ-86): Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 3—16.

10.1. **Назаров Н. И.** Некоторые вопросы старения конденсаторной изоляции//Тезисы докладов к совещанию «Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок» (г. Серпухов). М.: Информэлектро. 1979. С. 37.

10.2. **Якименко Г. В., Комаровский Л. Е.** Совершенствование методов оценки электрической прочности конденсаторной бумаги//Электронная техника. Сер. Радиодетали и компоненты. 1978, вып. 4(29). С. 33—38.

10.3. **Якименко Г. В.** Влияние диэлектрических характеристик конденсаторной бумаги на качество изготовленных из нее конденсаторов//Совершенствование технологии производства тонких электроизоляционных видов бумаги. Киев: 1983. С. 99—104.

10.4. **Белетская Е. В., Переселенцев И. Ф., Гинзбург Е. Л.** Пути повышения срока службы низковольтных силовых конденсаторов на основе металлизированной пленки//Тезисы докладов к всесоюзному совещанию «Состояние и перспективы развития электрической изоляции» (г. Свердловск). Л.: НТОЭиЭП. 1987. С. 17.

10.5. **Weller W. G., Church H. F.** Solid particles in liquid impregnated paper capacitors//The BEAMA El. Ins. Conf., Sess. 4, Pow. Cap., pap. 4d, 1970.

10.6. **Пленочно-бумажный** диэлектрик в условиях воздействия электрического поля, включая перенапряжения/Е. А. Самсонов, П. Н. Бондаренко,

В. Г. Жилкин, А. А. Сорокин//Электротехническая промышленность. Сер. АВН, трансформаторы, силовые конденсаторы. 1984. Вып. 4 (150). С. 2, 3.

10.7. **Menkart G. R., Waldon P. L.** New St×T formula uses temperature and voltage as key to longer life capacitors//CIGRE. S1/S8, 1964.

10.8. **Варшавский Д. С.** Ускоренные испытания конденсаторов переменного тока на срок службы//Изв. вузов. Энергетика. 1969. № 12. С. 98—102.

10.9. **Александрова Н. П., Мани А. К.** Методика расчета срока службы конденсаторов//Передача энергии постоянным и переменным током. Тр. НИИПТ. Л.: Энергия. 1980. Вып. 29. С. 3—14.

10.10. **Александрова Н. П., Мани А. К., Мамина Р. Н.** Закономерности старения изоляции и оценка срока службы силовых конденсаторов//Исследование старения и срока службы внутренней изоляции электрооборудования высокого напряжения. Тр. НИИПТ. Л.: Энергоатомиздат, 1985. С. 7—12.

10.11. **Варшавский Д. С., Варшавский А. Д.** Прогнозирование ресурса конденсаторов переменного тока по результатам приемо-сдаточных испытаний//Тезисы докладов к совещанию «Повышение качества и улучшение технико-экономических показателей силовых конденсаторов и комплектных конденсаторных установок». М.: Информэлектро. 1979. С. 53—54.

10.12. **П. Же.** Доклад на симпозиуме Проделек—Боллоре. М.: 1984 (издание фирмы «Проделек»).

10.13. **Беленький Б. П.** Прогнозирование ресурса высоковольтных конденсаторов с органическим диэлектриком//Тезисы докладов к всесоюзному совещанию «Состояние и перспективы развития электрической изоляции» (г. Свердловск). Л.: НТОЭиЭП. 1987. С. 28.

10.14. **Самсонов Е. А., Жилкин В. Г.** Исследование процесса старения бумажной и пленочно-бумажной конденсаторной изоляции, пропитанной опытными образцами жидкостей в условиях повышенных напряженностей электрического поля//Тезисы докладов к всесоюзной конференции «Конденсаторы и конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности и качества напряжения». М.: Информэлектро. 1986. С. 27—28.

10.15. **Самсонов Е. А., Жилкин В. Г., Ступин Ю. И.** Ускоренная оценка работоспособности пропитанного диэлектрика силовых конденсаторов//Тезисы докладов к всесоюзн. совещанию «Состояние и перспективы развития электрической изоляции» (г. Свердловск). Л.: НТОЭиЭП, 1987. С. 18—19.

10.16. **Аракелян В. Г., Дарьян Л. А., Лоханин А. К.** Опыт применения газовой хроматографии для диагностики высоковольтных импульсных конденсаторов//Тезисы докладов к всесоюзн. совещанию «Состояние и перспективы развития электрической изоляции» (г. Свердловск). Л.: НТОЭиЭП. 1987. С. 39—40.

11.1. **Parkman N., Stright J. H.** Polymer-liquid interaction in polypropylene high voltage capacitors//BEAMA, International Electr. Insulat. Conf., London, Brighton, May 10—13, 1984.

12.1. **Морозов М. М.** Силовые конденсаторы//Развитие электротехники в СССР. М.: Цинтиэлектропром. 1962. С. 105.

12.2. **Power capacitors.** IEC-publicat. 831-1, 871-1.

12.3. **Recommendation** for capacitors for inductive heat generating plants operating of frequences between 40 and 24000 Hz. IEC-publicat. 110.

12.4. **Coupling capacitors** and capacitor dividers. IEC-publicat. 358.

12.5. **All-film** power capacitor with folded electrode foil/T. Umemura, K. Abo, K. Akiama, J. Tanaka//Trans. IEEE on Power Delivery, vol. PVDR-2, № 1, July 1987. P. 181.

13.1. **Справочник** по электрическим конденсаторам/Под ред. В. В. Ермуратского/Кишинев: Штиинца, 1982.

13.2. **Ануфриев В. А., Гусев В. Н., Смирнов В. Ф.** Эксплуатационные характеристики и надежность электрических конденсаторов. М.: Энергия, 1976.

13.3. **Справочник** по расчету режимов работы электрических конденсаторов/О. Л. Мезенин, М. Н. Гураевский, В. В. Конотоп, Б. Г. Набока. Киев. Техніка, 1987.

13.4. **Назаров Н. И.** К расчету потерь в конденсаторном диэлектрике при несинусоидальном напряжении//Изв. вузов. Энергетика. 1987. № 3. С. 59.

14.1. **Михеев В. А., Михеева И. М.** Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.

14.2. **К вопросу** теплового расчета металлобумажных конденсаторов переменного тока/В. А. Акопян, С. А. Восканов, И. А. Петросян, Ю. С. Чатинян//Электротехника. 1971. № 7. С. 40.

14.3. **Табакс К. К., Фрейманис У. А.** К расчету температурного поля в анизотропной призме с внутренними источниками тепла//Ученые записки Рижского политехнического ин-та. 1965. Т. XIV. Вып. 5. С. 255.

14.4. **Фрейнманис У. А.** К тепловому расчету бумажно-масляного конденсатора//Там же. С. 433.

14.5. **Садовников А. И., Алексеева О. Г.** Графоаналитический метод расчета компенсации изменения объема жидкого диэлектрика от изменения температуры//Силовое конденсаторостроение. М.: Информэлектро. 1968. С. 96—101.

15.1. **Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А.** Расчет индуктивности. Л.: Энергоатомиздат, 1986.

15.2. **Техника** больших импульсных токов и магнитных полей/Под ред. В. С. Комелькова. М.: Атомиздат. 1970.

16.1. **Shunt-capacitors.** NEMA-Standard, Publ. № Cpl, New York, 1973.

17.1. а) **ГОСТ 1282-88** (СТ СЭВ 294-84). Конденсаторы для повышения коэффициента мощности. Общие технические условия.

б) **ГОСТ 27390-87.** Конденсаторы самовосстанавливающиеся для повышения коэффициента мощности. Термины и определения. Технические требования. Правила приемки. Методы испытаний.

17.2. **ГОСТ 15581-80.** Конденсаторы для емкостной связи, отбора мощности и измерения напряжения в фарфоровых корпусах.

17.3. **ГОСТ 18689-81.** Конденсаторы для электротермических установок на частоту от 0,45 до 10 кГц.

17.4. **ГОСТ 1516.2-76.** Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжения 3 кВ и выше.

18.1. **Куц П. С., Пикус И. Ф.** Теплофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. Минск: Наука и техника. 1979.

18.2. **Переселенцев И. Ф.** Влияние процесса термовакуумной обработки на электрические характеристики силовых бумажных конденсаторов//Электротехника. 1964. № 6. С. 48—50.

18.3. **Переселенцев И. Ф.** Основные технические вопросы совершенствования силовых конденсаторов//Развитие силового конденсаторостроения. М.: ЦИНТИ электропром-сти и приборостроения. 1962. С. 57.

18.4. **Назаров Н. И.** Сорбционные свойства конденсаторных бумаг. Библиографич. указатель ВИНИТИ «Депонированные рукописи», 1979, 6(92). С. 76.

18.5. **Kahle M.** Die Adsorption von Wasserdampf an Elektroisolierpapieren. Wissensch. Zs. techn. Hochschule Ilmenau, Jgng 19 (1963), H. 5. S. 647.

18.6. **Калинина Л. С.** Исследование гигроскопических свойств и массообменных характеристик электроизоляционных целлюлозных материалов: Автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук (Ин-т тепломассообмена АН БССР, Минск), 1974.

18.7. **Grossenkatthofer H. D.** Der Trocknungsprozess von Papierisolation und der Einfluß der Restfeuchte auf die elektrischen Eigenschaften des impragniertes Dielektrikums: Diss. Dokt.-Ing., Fakultat fur Maschinenwesen der techn. Univ. Hannover.

18.8. **Куц П. С., Пикус И. Ф., Калинина Л. С.** Исследование гигроскопических свойств электроизоляционных целлюлоз при низких давлениях//Тепломассоперенос. Минск. Ин-т тепломассообмена АН БССР, 1972.

18.9. **Назаров Н. И.** Геометрические факторы и электрические характеристики силового конденсатора//XIII научно-техническая конференция ВЗЭИ (Тезисы докладов). М.: ВЗЭИ. 1963. С. 61—63.

18.10. **Flowers L. C.** Moisture evaluation rates calculated for cellulose paper undergoing thermal dekomposition//Insulation. 1964. № 10. P. 23—26.
19.1. **Бородулин Б. М., Герман Л. А.** Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог переменного тока. М.: Транспорт, 1976, 136 с.
19.2. **Электрические** конденсаторы. Конденсаторные установки: Справочник/Под общ. ред. Г. С. Кучинского. М.: Энергоатомиздат, 1987.
19.3. **Ильяшов В. Н.** Конденсаторные установки промышленных предприятий. М.: Энергия, 1972.
19.4. **Берковский А. М., Лысков Ю. И.** Мощные конденсаторные батареи (шунтовые). М.: Энергия, 1967.
19.5. **Баркан Я. Д.** Автоматическое управление режимом батарей конденсаторов. М.: Энергия, 1978.
19.6. **Series capacitor** for power system//IEC-publication 143. 1972.
19.7. **Internal fuses** for series capacitors. IEC-publication 595, 1977.
19.8. **White W., Galperin I.** Material consideration for high frequency, high power capacitors//IEEE Transact. on Electrical Insulat. 1985. Vol. EI-20. № 1. February. P. 66—69.
19.9. **Глебов И. А., Кашарский Э. Г., Рутберг Ф. Г.** Синхронные генераторы кратковременного и ударного действия. Л.: Наука, 1985.
19.10. **Комин А. В., Кучинский В. Г.** Мощные импульсные источники питания. Л.: НИИЭФА им. Д. В. Ефремова, 1978.
19.11. **Ермуратский В. В.** Где и как применяются конденсаторы//Кишинев: Штиинца, 1981.
19.12. **Малюшевский П. П.** Основы разрядно-импульсной технологии. Киев: Наукова думка, 1989.
19.13. **Сборник** информационных листков. Пятая Всесоюзная конференция по инженерным проблемам термоядерных реакторов. М.: Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по атомной науке и технике, 1990. С. 36—38.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Производственно-практическое издание

Кучинский Георгий Станиславович
Назаров Николай Иванович

СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Зав. редакцией *М. П. Соколова*
Редактор издательства *Н. Б. Фомичева*
Художник обложки *А. Т. Кирьянов*
Художественный редактор *В. А. Гозак-Хозак*
Технический редактор *Н.В. Чиранова*
Корректор *М. Г. Гулина*
ИБ № 2074

Сдано в набор 24.05.91. Подписано в печать 22.10.91. Формат 60 × 88 1/16. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,60. Усл. кр.-отт. 19,84. Уч.-изд. л. 21,16. Тираж 1000 экз. Заказ 595. С038.

Энергоатомиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в Московской типографии № 9 НПО "Всесоюзная книжная палата" Министерства печати и информации Российской Федерации
109033, Москва, Волочаевская ул., 40.